

Design of a Composite Chassis Car

Rui Pedro dos Santos Costa

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. António Torres Marques



Mestrado integrado em Engenharia Mecânica

setembro de 2016

Resumo

Esta dissertação incide sobre uma questão recorrente neste início do Século XXI, visando o estudo da aplicação de novos materiais ao chassi de um automóvel, com vista à diminuição do seu peso e, no mínimo, garantir as mesmas condições de segurança que o chassi homólogo em aço.

O projeto iniciou com a discussão sobre qual o automóvel alvo de estudo, e ficou decidido que este estudo iria incidir sobre o primeiro automóvel português produzido em série, o *Sado 550*. Ficou também decidido que iriam ser utilizados materiais compósitos na construção do chassi, devido às suas boas propriedades mecânicas associadas a uma baixa densidade.

Posto isto, foi necessário recolher informação acerca do automóvel, que tendo a sua produção sido limitada a pequenas séries e, sendo que o último automóvel produzido da marca *Sado 550* já tem algumas dezenas de anos, revelou-se uma tarefa complicada.

Sendo sabido que os materiais a serem utilizados eram os compósitos, foi feito um estudo exaustivo, no sentido de conhecer mais acerca desses materiais e do seu comportamento quando aplicados estruturalmente. Com base nas suas propriedades e custos um compósito à base de fibra de vidro foi o material eleito para a construção deste chassi.

Neste texto é ainda visível uma referência cuidada acerca da importância da escolha do material e que forma lhe dar para tirar o maior proveito.

Antes de passar para o design propriamente dito, são tomadas em conta uma série de cautelas a ter na utilização dos materiais compósitos, e quais os pontos a ter em atenção ao projetar uma estrutura deste tipo.

No final do documento serão dadas a conhecer algumas simulações computacionais que validem a estrutura a ser proposta.

Abstract

This dissertation focuses about a recurrent question in this XXI Century beginning, with the purpose to study new materials for a chassis car, in order to reduce its weight and, at least, ensure the same security conditions that the homologous steel chassis.

The project starts with a discussion about which car would be studied, and it was decided that this study would focus on the first Portuguese car produced in series, the *Sado 550*. It was soon also decided that would be used composite materials in the chassis, due to their good mechanical properties associated with low density.

After that, it was necessary to gather information about the car, which had its production limited to small series, and wherein the last manufactured *Sado 550* already has some decades, it proved to be a complicated task.

Being known that the materials to be used would be composites, it has been made an exhaustive study, in order to know more about these materials and their behavior when applied structurally. Based on their properties and cost a glass fiber-based composite was chosen for the construction of the chassis.

In this text, it is still visible a careful reference about the importance of choosing the material and the shape to make the most.

Before moving on to the design itself, are taken into account a number of guarantees to have the use of composite materials, and which points to keep in mind when designing such a structure.

At the end of the document will be shown some computer simulations to validate the structure to be proposed.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Doutor António Torres Marques, pela sua constante disponibilidade para me ajudar, e estar presente, mesmo quando não foi solicitado quis dar o seu contributo e isso é muito encorajador e gratificante. Agradeço ainda a sua simpatia e atenção, bem como a reunião de esforços e pessoas para tentar tornar este projeto possível.

Mostro-me imensamente grato pela disponibilidade e vontade em ajudar dos investigadores Marco Parente e Bruno Areias, que auxiliaram bastante com diversas dúvidas que foram surgindo na utilização do *software* ABAQUS.

À Dona Paula Moura, do Museu dos Transportes e Comunicações, da Alfândega do Porto, pela ajuda prestada na pesquisa bibliográfica acerca do *Sado 550*.

A todos os colegas e professores da FEUP que de alguma maneira apoiaram e ajudaram na realização deste trabalho.

À minha família e namorada pelo apoio e motivação dado ao longo de todo o curso e deste trabalho.

À minha avó que pelo seu exemplo de vida me motivou, indiretamente, para a realização deste trabalho.

Índice de Conteúdos

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	2
1.2	O desenvolvimento do projeto	2
1.3	Objetivos do projeto	2
1.4	Método seguido no projeto	3
1.5	Estrutura da dissertação	3
2	ESTADO DE ARTE	5
2.1	O automóvel – Sado 550	6
	Projeto	7
	Carroçaria	13
	Interior	14
	Mecânica	15
	Considerações Finais	17
2.2	O chassi	18
3	MATERIAIS COMPÓSITOS	23
3.1	Reforço	24
3.1.1	Fibra de Vidro	25
3.1.2	Fibra de Carbono	26
3.1.3	Fibra de Aramida	28
3.1.4	Fibra de Boro	29
3.2	Matriz	30
	Termoplástica	30
	Termoendurecível	31
3.3	Processamento de Materiais Compósitos	33
3.3.1	Moldação por contato	33
3.3.2	Moldação por compressão a quente	35
3.3.3	Moldação em Autoclave	35
3.3.4	Moldação por injeção de resina	36
3.3.5	Pultrusão	37
3.4	Maquinagem de Materiais Compósitos	38
3.5	Análise das camadas dos laminados	42
3.6	Fadiga em Materiais Compósitos	44
3.7	Estruturas Sanduíche	48
3.7.1	Modos de falha	48
3.7.2	Propriedades	49
3.7.3	Tensões num elemento de viga	50
3.7.4	Encurvadura de Estruturas Sanduíche	51
3.7.5	Outros tipos de dano	52
3.7.6	Problemas de fabrico e design	53
3.7.7	Controlo de qualidade não destrutivo	56

4	SELEÇÃO DE MATERIAL E FORMA	57
4.1	Seleção de Material	58
4.1.1	Módulo de Young	58
4.1.2	Tensão de rotura	60
4.1.3	Tenacidade à fratura	60
4.1.4	Resistência à fadiga	61
4.1.5	Custos	61
4.2	Seleção de formas	62
4.2.1	Fator de forma	62
4.3	Selecionar conjuntamente material e forma	67
4.3.1	Escolhendo conjuntamente por cálculos	67
4.3.2	Escolhendo conjuntamente por gráficos	67
4.4	Conclusões	69
5	CONSIDERAÇÕES ANTES DE PROJETAR	71
5.1	Ligações em compósitos	72
5.1.1	Ligações Aparafusadas e Rebitadas	72
5.1.2	Ligações coladas	75
5.1.3	Ligações por fusão	76
6	CASOS DE ESTUDO	77
6.1	Parâmetros a considerar	78
6.1.1	Rigidez torcional	78
6.1.2	Flexão	79
6.1.3	Ligações aparafusadas entre os componentes	81
6.2	O Modelo	81
6.3	Definição dos pontos críticos	81
7	DESIGN	83
7.1	Modelos do tipo 1	88
7.2	Modelos do tipo 2	91
8	RESULTADOS	93
8.1	Modelos do tipo 1	94
8.2	Modelos do tipo 2	99
8.3	Análise dos Resultados	101
8.4	Resultados do modelo escolhido	102
8.5	Concentração de tensões	103
8.6	Considerações sobre os resultados obtidos	104
9	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO	105
	REFERÊNCIAS	107
	ANEXO A: PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	109
	ANEXO B: FATORES DE FORMA	117
	ANEXO C: CONTROLO DE QUALIDADE DAS ESTRUTURAS SANDUÍCHE	123
	ANEXO D: RESULTADOS OBTIDOS PARA OS DIFERENTES CHASSIS	127

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Estacionamento perpendicular ao eixo da via, excede um pouco a largura de um utilitário normal; in “Santos T. T., O Conceito, Sado/550 – O Microcarro Português, 2013”.....	8
Figura 2.2 - Simplicidade da carroçaria do Sado/550; in “ http://rodasdeviriato.blogspot.pt/search/label/Sado%20550 , consultado em 2016-03-25, 15:06”.....	9
Figura 2.3 - Primeiros Protótipos; in “ http://www.jcle.pt/sado550/ , consultado em 2016-03-29, 17:43”.....	11
Figura 2.4 - Testes que foram realizados com os primeiros protótipos; in “Santos T. T., O Conceito, Sado/550 – O Microcarro Português, 2013”.....	12
Figura 2.5 - Símbolo dos CTT ainda é visível em alguns dos Sado/550; in “ http://1140tv.blogspot.pt/ , consultado em 2016-03-25, 09:39”.....	12
Figura 2.6 - Interior do Sado/550; in “ http://rodasdeviriato.blogspot.pt/search/label/Sado%20550 , consultado em 2016-03-25, 15:06”.....	15
Figura 2.7 - Carrinhas Daihatsu Wide55 e Hi-Jet 550, equipadas com o motor AB20 da Daihatsu; in “ http://www.jcle.pt/sado550/ , consultado em 2016-03-29, 17:43”.....	16
Figura 2.8 - Chevrolet Corvette com a carroçaria em fibra de vidro; in “ http://www.carroantigo.com/portugues/conteudo/curio_primeiros.htm , consultado em: 2016-04-02, 15:30”.....	19
Figura 2.9 - McLaren MP4/1, primeiro automóvel com chassi em fibra de carbono; in “ https://pt.wikipedia.org/wiki/McLaren_MP4/1 , consultado em 2016-04-02, 16:00”.....	19
Figura 2.10 - McLaren F1, primeiro automóvel de rua com chassi monocoque totalmente em fibra de carbono; in “ http://www.autoentusiastascassic.com.br/2013/11/mclaren-pioneira-na-fibra-de-carbono.html , consultado em 2016-04-02, 16:30”.....	20
Figura 2.11 - Renault R24, com chassi híbrido, 2004; in “ https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_R24 , consultado em 2016-04-03, 10:00”.....	20
Figura 2.12 - Chassi do Lamborghini Aventador LP700-4, totalmente em fibra de carbono; in “ http://www.lamborghini.com/en/models/aventador-lp-700-4/innovation-technology/chassis/ , consultado em 2016-04-03, 16:00”.....	21
Figura 2.13 - Lamborghini Aventador LP700-4; in “ http://www.lamborghini.com/en/models/aventador-lp-700-4/innovation-technology/chassis/ , consultado em 2016-04-03, 16:00”.....	21
Figura 2.14 - BMW i3; in “ http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/360_electric.html , consultado em 2016-04-06, 08:30”.....	22
Figura 2.15 - BMW i3, arquitetura LifeDrive em que separa o Life Module, parte de cima, do Drive Module, parte inferior onde tem a suspensão, rodas e bateria; in “ http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/concept.html , consultado em 2016-04-06, 08:30”.....	22
Figura 3.1 - Fibra de Vidro.....	25
Figura 3.2 - Produção de fibra de carbono a partir do PAN (Moura <i>et al</i> , 2011).....	27
Figura 3.3 - Áreas que mais utilizavam a fibra de carbono em 2012; in “ http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/carbon-fibre-reinforced-plastics-market-continues/ , consultado em 2016-04-11, 23:17”.....	27

Figura 3.4 - Fibra de Aramida.	29
Figura 3.5 – Gráfico de tensão-alongamento das fibras e da matriz (Phillips, 1989).	30
Figura 3.6 - Esquema da obtenção de compósitos por moldação manual, adaptado de Gay & Hoa (2007).	34
Figura 3.7 - Esquema de obtenção de compósito por moldação por projeção (Moura <i>et al</i> , 2011).	34
Figura 3.8 - Esquema da moldação por compressão, adaptado de Gay & Hoa (2007).	35
Figura 3.9 - Esquema de formação de um laminado através do autoclave (Moura <i>et al</i> , 2011).	36
Figura 3.10 - Esquema da moldação por injeção de resina, aplicada à indústria automóvel, adaptado de Gay & Hoa (2007).	37
Figura 3.11 - Obtenção de perfis por pultrusão; in “ https://fiberline.com/pultrusion , consultado em 2016-07-15, 16:30”	37
Figura 3.12 - Brocas: a) Helicoidal; b) tipo "Brad" adaptado de Durão <i>et al</i> (2011).	39
Figura 3.13 - Delaminação por furação: a) Delaminação à entrada da broca; b) Delaminação à saída da broca; adaptado de Durão <i>et al</i> (2011).	39
Figura 3.14 - Definição de ângulo de orientação das fibras (Calzada <i>et al</i> , 2011).	40
Figura 3.15 - Forças envolvidas no corte em função da orientação das fibras (Calzada <i>et al</i> , 2011).	40
Figura 3.16 - Representação esquemática e microscópica do corte de compósitos em várias inclinações diferentes (Calzada <i>et al</i> , 2011).	41
Figura 3.17 - Previsão das propriedades do compósito de acordo com a fração de volume de fibra (fibra de vidro/epóxico) (Tsai, 2008).	43
Figura 3.18 - Evolução típica em fadiga da rigidez normalizada de um compósito de carbono-epóxico multidirecional, adaptado de Moura <i>et al</i> (2011).	45
Figura 3.19 - Bandas de corte observadas em ensaios de compressão de compósitos unidirecionais (Moura <i>et al</i> , 2011).	46
Figura 3.20 - Critério de rotura Hill-Tsai (Gay & Hoa, 2007).	47
Figura 3.21 - Estrutura Sanduíche ($10 \leq e_d/e_p \leq 100$) (Gay & Hoa, 2007).	48
Figura 3.22 - Representação de uma estrutura sanduíche solicitada à flexão (Gay & Hoa, 2007).	51
Figura 3.23 - Tensões numa estrutura sanduíche (Gay & Hoa, 2007).	51
Figura 3.24 - Coeficientes de encurvadura para diferentes condições fronteira (Gay & Hoa, 2007).	51
Figura 3.25 - Encurvadura local das faces (Gay & Hoa, 2007).	52
Figura 3.26 – Dano por encurvadura local (Gay & Hoa, 2007).	52
Figura 3.27 – Esmagamento local (Gay & Hoa, 2007).	52
Figura 3.28 - Resistência à compressão de painéis sanduíche constituídos por Kevlar face aos constituídos por fibra de vidro (Gay & Hoa, 2007).	53

Figura 3.29 - Ninho de abelha (Gay & Hoa, 2007).....	53
Figura 3.30 - Colocação de enxertos de resina para acoplamento de peças (Gay & Hoa, 2007).	54
Figura 3.31 - Algumas formas de ligar painéis sanduíche (Gay & Hoa, 2007).	55
Figura 3.32 - Reparação de estruturas sanduíche (Gay & Hoa, 2007).....	55
Figura 4.1 - Diagrama da escolha do índice de material consoante a aplicação requerida (Ashby, 2005).....	60
Figura 4.2 - Modos elementares de solicitações e formas-seções utilizadas para suportar esses esforços: a) tração; b) flexão; c) torção; d) compressão (Ashby, 2005).	64
Figura 4.3 - a) Um conjunto de secções retangulares com $\phi_{Be} = 2$; b) um conjunto de secções em “I” com $\phi_{Be} = 10$; c) um conjunto de tubos com $\phi_{Be} = 12$. Membros de determinado grupo são ampliações ou reduções dos outros (Ashby, 2005).....	64
Figura 4.4 – Momento de segunda ordem, I , face à área da secção, A . Estruturas eficientes têm altos valores do rácio I/A^2 ; estruturas ineficientes (que fletam facilmente) tem baixos valores. Secções de estruturas reais tem valores de I e A que se encontram nas zonas sombreadas. Existem limites para os valores de A e da eficiência da forma ϕ_{Be} que dependem do material (Ashby, 2005).....	65
Figura 4.5 – O material estruturado comporta-se como um novo material de módulo $E^* = E\phi_{Be}$ e densidade $\rho^* = \rho\phi_{Be}$, movendo-se de uma posição abaixo da linha tracejada para uma posição acima (Ashby, 2005).....	68
Figura 5.1 - Juntas com furo, de sobreposição simples e de sobreposição dupla (Teixeira, 2014).	73
Figura 5.2 - Definição de parâmetros geométricos de uma junta (Moura <i>et al</i> , 2011).	73
Figura 5.3 – Ligações e esforços a evitar em determinadas secções de materiais compósitos; in “ http://www.fiberline.com/ , consultado em 2016-07-25, 08:49”	73
Figura 5.4 - Modos de rotura em juntas com furos (Teixeira, 2014).	74
Figura 5.5 - Modos de ligações coladas mais comuns (Teixeira, 2014).	75
Figura 5.6 - Modos de rotura típicos das ligações coladas (Teixeira, 2014).	76
Figura 6.1 - Efeito da torção num chassi (Teixeira, 2014).	78
Figura 6.2 - Parâmetros a considerar para o cálculo da rigidez do chassi (Teixeira, 2014).....	79
Figura 6.3 - Efeito da flexão num chassi (Teixeira, 2014).....	80
Figura 6.4 - Representação da flexão lateral no chassi (Teixeira, 2014).	80
Figura 7.1 – Esquema dos painéis de sanduíche a utilizar no chassi.....	85
Figura 7.2 - Modelo 1 (vista de cima).....	88
Figura 7.3 - Modelo 1A.	89
Figura 7.4 - Modelo 1C.	89
Figura 7.5 - Modelo 1D.	90
Figura 7.6 - Modelo 2A	91

Figura 8.1 - Concentração de tensões na condição fronteira, evidenciada a vermelho e azul (Modelo 1DB, caso 4).	103
Figura 9.1 - Diagrama $E - \rho$ para três índices diferentes de material para obter máxima rigidez e mínima massa (Ashby, 2005).	109
Figura 9.2 - Diagrama $E - \rho$ para o índice de material $M=E^{1/2}/\rho$ (Ashby, 2005).	109
Figura 9.3 - Diagrama que coloca a tensão de rotura σ_f em função da densidade ρ e do material com três índices diferentes (Ashby, 2005).	110
Figura 9.4 - Módulo específico, E/ρ , representado face à tensão de rotura específica, σ_f/ρ (Ashby, 2005).	111
Figura 9.5 - Módulo de Young, E , representado face à tensão de rotura, σ_f (Ashby, 2005).	111
Figura 9.6 - Tenacidade à fratura, K_{1C} , representada face ao módulo de Young, E . A linha espessa representada a cinzento representa a “condição necessária” para fratura (Ashby, 2005).	112
Figura 9.7 – Tenacidade à fratura, K_{1C} , representada face à tensão de rotura, σ_f . As <i>Guidelines</i> são usadas para escolher os materiais mais tolerantes ao dano (Ashby, 2005).	113
Figura 9.8 - Módulo de Young, E , representado face ao custo relativo por unidade de volume, $C_{v,R}$. As <i>guidelines</i> ajudam a maximizar a rigidez por unidade de custo (Ashby, 2005).	114
Figura 9.9 - Tensão de rotura, σ_f , representada face ao custo relativo por unidade de volume $C_{v,R}$. As <i>guidelines</i> ajudam a maximizar a tensão de rotura por unidade de custo (Ashby, 2005).	115
Figura 9.10 - a) Custo aproximado por unidade de massa $\$/kg$. Os materiais mais correntes custam aproximadamente $\$1/kg$, materiais “especiais” podem custar muito mais. b) Custo aproximado por unidade de volume $\$/m^3$ (Ashby, 2005).	116
Figura 9.11 - O mapa dos 4 quadrantes é utilizado para explorar secções estruturais para design limitado à rigidez. Cada mapa partilha os seus eixos com os mapas adjacentes (Ashby, 2005).	119
Figura 9.12 – Esquema demonstrativo de como usar o mapa dos quatro quadrantes (Ashby, 2005).	120
Figura 9.13 – Uma comparação de secções de aço, alumínio e madeira (steel, aluminium, wood) para um design limitado à rigidez, com $EI=10^6 \text{ N.m}$ (Ashby, 2005).	120
Figura 9.14 – Constantes que são utilizadas no cálculo de deslocamentos e rotações de vigas, para diferentes solicitações e condições fronteira (Ashby, 2005).	121
Figura 9.15 - Principais métodos de teste não destrutivos de estruturas sanduíche (Gay & Hoa, 2007).	123
Figura 9.16 – Principais métodos de teste não destrutivos de estruturas sanduíche (continuação) (Gay & Hoa, 2007).	124
Figura 9.17 - Técnica de emissão acústica (Gay & Hoa, 2007).	125
Figura 9.18 – Representação de um evento de emissão acústica (Gay & Hoa, 2007).	125

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Pares ligantes entre matriz e reforço, adaptado de Phillips (1989).....	23
Tabela 3.2 - Propriedades de fibras e materiais convencionais, adaptado de Agarwal & Broutman (1980).....	24
Tabela 3.3 - Propriedades dos mais comuns tipos de fibra de vidro, adaptado de Moura <i>et al</i> , 2011.....	25
Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas de fibras de Aramida, adaptado de Moura <i>et al</i> (2011); Agarwal & Broutman (1980).	28
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas de fibras de boro em função do seu diâmetro, adaptado de Moura <i>et al</i> (2011).	29
Tabela 3.6 – Principais características de algumas matrizes termoplásticas que podem ser usadas estruturalmente (Moura <i>et al</i> , 2011).....	31
Tabela 3.7 – Principais características das matrizes termoendurecíveis de alta resistência e mais comuns (Moura <i>et al</i> , 2011).....	32
Tabela 3.8 – Principais mecanismos de falha de estruturas sanduíche e causas para o seu aparecimento (Almeida, 2013).....	49
Tabela 3.9 - Vantagens e desvantagens da utilização de painéis sanduíche, adaptado de Almeida (2013).....	50
Tabela 3.10 – Propriedades dos materiais mais comuns utilizados nas estruturas ninho de abelha (Gay & Hoa, 2007).....	54
Tabela 4.1 - Definição dos símbolos, adaptado de Ashby (2005).....	65
Tabela 4.2 - Valores máximos empíricos para os fatores de forma (Ashby, 2005).....	66
Tabela 4.3 - Seleção de material para uma viga leve e rígida (Ashby, 2005).....	67
Tabela 4.4 - Definição dos fatores de forma (os valores A, I, K, Z e Q estão presentes na Tabela 9.1)	69
Tabela 7.1 - Representação esquemática das diversas condições fronteiras, bem como dos esforços aplicados.	84
Tabela 7.2 - Propriedades dos materiais utilizados nos modelos do tipo 1.	86
Tabela 7.3 - Tensões limite segundo as diferentes direções para a Fibra de Vidro utilizada nos modelos de tipo 1.	86
Tabela 7.4 - Propriedades dos materiais utilizados nos modelos do tipo 2.	87
Tabela 7.5 - Valores limite de tensão do material utilizado nos modelos de tipo 2 (Fiberline, s.d.).	87
Tabela 8.1 - Orientação das fibras consoante o modelo.....	94
Tabela 8.2 - Resultados para o Modelo 1.	94
Tabela 8.3 - Resultados para o Modelo 1A.....	94
Tabela 8.4 - Resultados para o Modelo 1B.....	95

Tabela 8.5 - Resultados para o Modelo 1C.	95
Tabela 8.6 - Resultados para o Modelo 1D.	95
Tabela 8.7 – Resultados para o Modelo 1DA.	96
Tabela 8.8 – Resultados para o Modelo 1DB.	96
Tabela 8.9 – Resultados para o Modelo 1DC.	96
Tabela 8.10 - Resultados para o Modelo 1DD comparativamente com 1DB.	97
Tabela 8.11 - Resultados para o Modelo 1DE comparativamente com 1DB.	97
Tabela 8.12 - Resultados para o Modelo 1DD comparativamente com 1DB.	97
Tabela 8.13 - Resultados para o Modelo 1DG comparativamente com 1DB.	98
Tabela 8.14 - Resultados para o Modelo 1DH comparativamente com 1DB.	98
Tabela 8.15 - Perfis em I Fiberline.	99
Tabela 8.16 - Resultados para o Modelo 2.	99
Tabela 8.17 - Resultados para o Modelo 2A.	100
Tabela 8.18 - Comparação lado a lado dos resultados dos diferentes modelos.	101
Tabela 8.19 - Resultados do Modelo 1DB para os diferentes casos, com elementos de tamanho 7.	102
Tabela 8.20 - Resultados do Modelo 1DB para os diferentes casos, com elementos de tamanho 5.	102
Tabela 9.1 - Áreas, Momentos de segunda ordem das secções e Unidades (Ashby, 2005).	117
Tabela 9.2 - Fatores de eficiência de forma (Ashby, 2005).	118

Índice de Símbolos e Abreviaturas

Capítulo 2

” – polegadas [$1'' = 25,4 \text{ mm}$]

μm – micrómetro [$1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$]

θ – ângulo de orientação das fibras [$^\circ$]

cc – cilindrada [cm^3]

CFRP – Carbon Fibre Reinforced Plastic

Contos – mil escudos (moeda anterior ao Euro)

cv – potência (cavalo vapor) [$1 \text{ cv} = 745,7 \text{ W}$]

GFRP – Glass Fibre Reinforced Plastic

GRP – Glass Reinforced Plastic

RTM – Resin Transfer Moulding (Moldação por Transferência de Resina)

V12 – Notação utilizada para classificar um motor com 12 cilindros dispostos em V

Capítulo 3

ε - deformação

σ – tensão normal [MPa]

σ_{cr} – carga crítica de compressão [MPa]

τ – tensão de corte [MPa]

ν_c – coeficiente de poisson do núcleo (painel sanduíche)

$d\theta$ – ângulo infinitesimal

dx – comprimento infinitesimal

e_c – espessura núcleo [mm] (painel sanduíche)

E_c – módulo de elasticidade do núcleo [MPa] (painel sanduíche)

e_p – espessura faces [mm] (painel sanduíche)

E_p – módulo de elasticidade das faces [MPa] (painel sanduíche)

Fcr – carga crítica de encurvadura [N]

K – coeficiente de encurvadura

k – coeficiente de rigidez

M – momento resultante [N.m]

S – stiffness (coeficiente de rigidez)

T – esforço de corte [N]

Capítulo 4

α – proporcional

δ_c – COD (crack opening displacement) [m]

ϕ – quociente adimensional entre a rigidez da secção em estudo e uma secção de referência

ϕ_B^e – fator de forma para flexão elástica

ϕ_T^e – fator de forma para torção elástica

ϕ_B^f – fator de forma para flexão plástica (failure)

ϕ_T^f – fator de forma para torção plástica (failure)

ρ – massa volúmica [kg/m³]

θ – secção sólida de referência (quadrada)

A – área [m²]

b – lado de um quadrado

C_1 – constante que depende da distribuição da carga e das CF da viga

$C_{V,R}$ – custo relativo por unidade de volume

dA – área de elemento infinitesimal

I – momento de 2ª ordem da secção [m⁴]

K_{Ic} – tenacidade à fratura [MPa.m^{1/2}]

L – comprimento [m]

m – massa [kg]

M – índice de material

M_1 – índice de material/forma com a menor massa para uma dada rigidez

S – stiffness (coeficiente de rigidez) [N/m]

Capítulo 5

$\Delta z_1, \Delta z_2$ – deslocamento vertical após torção

K_{ch} – rigidez do chassi [Nm/°]

t – espessura [mm]

Capítulo 7/8

S11+ - Tensão de valor positivo (tração) segundo a direção 11.

S11- - Tensão de valor negativo (compressão) segundo a direção 11.

1 Introdução

Este projeto foi desenvolvido com vista a responder à constante procura de veículos que consumam menos e, sendo uma preocupação atual devido às taxas impostas nesta indústria e, devido à influência que ela tem no meio ambiente, que poluam menos, dessa forma procuram-se veículos mais leves, que tirem maior proveito do desempenho do seu motor. Se essa redução de peso for significativa, podem-se utilizar motores de menor cilindrada sem perder potência específica (potência por unidade de massa), e, conseqüentemente, ganhando em todos os pontos acima referidos.

Sendo uma área de grande reflexão atual, cabe aos engenheiros estudar a viabilidade da utilização de materiais “novos” na conceção de um chassi automóvel, de modo a conseguir fazer frente aos tradicionais chassis em aço, tentando reduzir o seu peso.

Foi, então, alvo de estudo neste trabalho, a viabilidade e o design de um chassi automóvel para ser feito em material compósito, que se tem revelado um grupo de materiais mais atual, uma vez que tem, em geral, características específicas superiores às do aço. Interessa aqui saber quais as limitações e vantagens de projetar um chassi em material compósito, relativamente ao aço, uma vez que apresentam comportamentos distintos.

O automóvel que foi estudado foi um *Sado 550*, primeiro automóvel português a ser produzido em série. Como se trata de um automóvel português e a sua produção já não é feita, este projeto surgiu com a ideia de se poder dar um novo fulgor a este veículo, para muitos esquecido, com um toque dos materiais mais recentes. Este veículo antecipou a ideia de sucesso do SMART, com 20 anos de antecedência, mas não teve os apoios necessários.

Tomou-se, ainda, em consideração a importância da escolha do material e que forma lhe dar, de modo a tirar o melhor partido das suas características, para uma determinada aplicação específica.

São analisados vários detalhes a ter em conta na aplicação dos materiais compósitos ao chassi, tais como ligações, a possibilidade de o compósito ser reparado, avaliar como surgem fissuras e pontos potenciais de rotura dos substratos e formas de os evitar.

Passa ainda pelo objetivo desta dissertação fazer o design do chassi, bem como realizar simulações recorrendo a *softwares* computacionais para validar a(s) proposta(s) de design.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Esta dissertação foi realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, no âmbito da unidade curricular de 2º semestre do quinto ano, dedicada à tese. Esta dissertação insere-se no ciclo de estudos para a atribuição do grau de Mestre a um estudante que pretende terminar o seu curso de Engenharia Mecânica, na área de Projeto e Construção Mecânica.

1.2 O desenvolvimento do projeto

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto privilegia a formação dos seus alunos de modo a deixá-los preparados para qualquer tipo de trabalho, projetos ou desafios que possam enfrentar na sua vida profissional, essencialmente, mas não só, na área de Engenharia.

Sendo sobejamente conhecidos os tradicionais chassis em aço, interessava agora realizar um estudo acerca da aplicabilidade dos materiais compósitos a esta estrutura nuclear de um automóvel, sabendo-se à partida o grande interesse que existe na redução de peso dos veículos, para nos levar às questões económico-ambientais, que são cada vez mais um dos caminhos obrigatórios no desenvolvimento de qualquer indústria, nomeadamente, a automóvel, que tanto influencia o nosso mundo atual. Por outras palavras, a razão do objetivo da diminuição do peso tem a ver com a diminuição do consumo, diminuição das emissões poluentes, e por sua vez ganho da relação potência/peso que estará diretamente associada à performance do veículo.

1.3 Objetivos do projeto

O projeto tem por objetivo o estudo da viabilidade da criação de um protótipo do automóvel português *Sado 550*, com um chassi em material compósito. Está ainda a meu cargo o design do chassi para esse protótipo, bem como o estudo da capacidade de resposta que esse chassi irá apresentar em situações das exigências que qualquer automóvel pode ter.

Sabe-se previamente a dificuldade que um projeto desse nível apresentará para um só estudante, já que em empresas que tratam destes assuntos existem equipas de projeto com vários engenheiros, o que facilita bastante este estudo, e mesmo assim é sabido que os materiais compósitos, nos chassis automóvel, não são usados em número superior ao tradicional aço, mesmo tendo em conta as enormes vantagens apresentadas por estes chassis, que foram apresentadas no ponto anterior (1.2).

1.4 Método seguido no projeto

Este projeto começou por um debate no qual ficou estabelecido quais os materiais a serem utilizados na conceção do chassi, e ainda na definição do automóvel a ter como modelo, o *Sado 550*.

Posteriormente, nas semanas seguintes, foi recolhida e analisada toda a informação possível acerca do *Sado 550*.

Nas semanas seguintes foi realizado um estudo exaustivo sobre o uso de materiais compósitos, e acerca da sua aplicação estrutural, suas limitações e vantagens.

Foi ainda realizado, posteriormente, em cerca de uma semana, um estudo sobre a escolha de material e das formas que trariam mais vantagens para a sua aplicação num chassi automóvel.

Nas últimas semanas do projeto, foi realizado o design propriamente dito bem como as simulações para validar o design, com a dissertação já praticamente escrita, faltava somente a colocação dos resultados obtidos. Os resultados obtidos foram a última coisa a ser colocada na dissertação e foram o culminar deste projeto.

1.5 Estrutura da dissertação

1. O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução ao projeto, bem como apresenta os principais pontos deste sem entrar em detalhes.
2. O segundo capítulo consiste num enquadramento histórico da importância e propósito do *Sado 550*.
3. O terceiro capítulo tem uma abordagem detalhada acerca dos materiais compósitos.
4. O quarto capítulo trata das vantagens oferecidas por uma escolha correta dos materiais envolvidos, bem como das formas a serem utilizadas, de modo a tirar o maior proveito.
5. No capítulo cinco são feitas algumas notas importantes antes de se passar ao design propriamente dito.
6. No capítulo seis é feita referência aos aspetos a ter em conta, relativamente ao chassi em condições de uso.
7. No capítulo sete é apresentado o design que foi idealizado para o automóvel.
8. No capítulo oito procede-se à validação de resultados do chassi.
9. No capítulo nove são tiradas as conclusões acerca deste projeto, bem como abordadas as perspetivas de trabalho futuro.
10. Em anexo, são apresentadas as imagens e tabelas que pela sua dimensão e/ou importância não deveriam estar presentes no corpo desta dissertação.

2 Estado de arte

Nesta fase preliminar do projeto foi necessária uma pesquisa bibliográfica demorada e cuidada, para entender o contexto em que o *Sado 550* surgiu, com a finalidade de servir que tipo de público, quais as principais características do automóvel, bem como conhecer quais as suas principais limitações.

Relativamente ao estudo dos materiais compósitos, que são os materiais a serem utilizados nesta dissertação, foi necessário um trabalho ainda mais minucioso, visto que o seu comportamento e características/limitações de design são diferentes das encontradas para os metais.

Foi ainda feita uma análise detalhada aos tipos de chassis já existentes, os designs utilizados e porquê, a sua evolução cronológica, bem como a aplicação dos materiais compósitos aos chassis e a sua viabilidade e proveito relativamente aos materiais que são mais comumente aplicados, como o aço ou o alumínio.

2.1 O automóvel - Sado 550

Os períodos pós-guerra são normalmente definidos por uma necessidade de gestão e reestruturação económica bastante cuidada, foi o que aconteceu com Portugal no período subsequente à segunda guerra mundial. Era necessária uma economia forte e independente relativamente ao mercado exterior. Portugal tinha, por essa altura, um imenso espaço geográfico, e a indústria automóvel tinha potenciais condições de desenvolvimento já que o mercado colonial oferecia uma perspetiva bastante alargada e animadora.

Vários empresários, técnicos e engenheiros percebendo essa lacuna no nosso mercado, e pelo fascínio e reconhecimento que traria uma evolução a esse nível para a indústria automóvel nacional, realizaram estudos e protótipos no sentido de tentar criar um veículo que fosse quase exclusivamente de incorporação nacional. No entanto, os projetos foram-se revelando “efémeros e estéreis”, mas essa ideia nunca foi esquecida. Já por volta da década de 80, a indústria automóvel virou-se quase exclusivamente para os todo-o-terreno e surgiram a Portaro e a UMM, sendo que a Portaro surgiu em competição ao mais alto nível. Faltava, ainda, criar um veículo que satisfizesse as classes com menores condições financeiras, de forma a atingir um público mais alargado, sobretudo a partir do 25 de Abril. Esta questão foi abordada pela Casal que na década de 70 tentou criar uma linha de produção do zero e acabou por apresentar o Pró-Zé, um veículo de três rodas com apenas 50 cc. Esta ideia só iria vingar mais tarde quando o grupo Entrepasto apresentou à escala industrial um veículo de 4 rodas, 2 lugares e um motor de 547 cc, o Sado 550 (Rodrigues J. C., 1995).

“Num país onde a indústria automóvel é praticamente inexistente, e o próprio comércio é perfeitamente anormal, encontrar alguém com o arrojo de meter ombros sozinhos à tarefa de construir um automóvel é assaz invulgar” (Piteira, 1983). Tomando como exemplo esta afirmação torna-se fácil entender o quão difícil era até então a situação da indústria automóvel no nosso país, deste modo justifica-se atribuir a este enorme passo, a construção de um automóvel português, uma designação “ousada” tendo em conta os recursos existentes, e sabendo que até então grande parte do que era necessário para a indústria automóvel teria que ser importado, visto que não tínhamos, ainda, uma estrutura formada de modo a satisfazer as necessidades nem do mercado das peças, nem tão pouco a necessária para se construir um rótulo nacional, de designação internacional *Made in Portugal*.

O aparecimento deste automóvel português foi uma ideia levada a cabo ao longo de vários anos, e surge num contexto em que as dificuldades económicas eram grandes, não apenas no setor automóvel, e como tal este conceito fazia todo o sentido, visto que se iam criar postos de trabalho e estimular o mercado dos componentes, bem como criar um veículo com características que permitissem um baixo custo de fabrico, baixo custo de aquisição e manutenção, num setor que necessitava de um “abanão”. Relativamente à homologação não haviam termos de comparação, e uma série de testes e estudos tiveram que ser realizados antes de simplesmente se partir do zero e tentar construir um automóvel, com um conhecimento português que era bastante limitado já que apenas tínhamos exemplos de automóveis importados e de um ou outro protótipo. Estes protótipos representavam sonhos mais arrojados de alguma pessoa ou empresa mais fanática, essencialmente pelo desporto de competição, e como tal não eram projetos vocacionados para serem veículos utilitários.

O projeto que levou ao estudo, construção e aparecimento do Sado 550 é unanimemente conhecido como “Projeto Ximba”. Este projeto nasceu através do Grupo Entrepasto, e teria como berço as instalações do Entrepasto Máquinas, onde se criou uma linha de montagem. Em 1975 foi criado o Gabinete de Estudos e Projectos (GEP) encarregue de desenvolver um veículo de dois lugares, de dimensões reduzidas e baixos consumos, de modo a satisfazer

essencialmente necessidades urbanas e suburbanas (Santos T. T., 2013). O que me leva a concluir que nessa altura o Grupo Entrepasto tinha já uma ideia de veículo idêntica à que é apresentada nos últimos anos pela Smart, cujo lançamento ocorreu apenas cerca de 20 anos depois (o lançamento dos primeiros Smart foram em 2002) do “nosso” Sado 550, e que conseguiu um tremendo sucesso.

Projeto

O “Projeto Ximba” apresentou duas fases distintas. Na fase inicial, entre 1975 e 78, em que foi discutida e definida a ideia que se pretendia para o automóvel. Superficialmente, pretendia-se um automóvel de reduzidas dimensões e, de apenas dois lugares, visto que se pôde comprovar com estudos que a maioria das deslocações eram realizadas entre casa-trabalho-casa, e que a média de passageiros por veículo era de uma a duas pessoas. Outro ponto que ficou desde cedo definido foi que o veículo tinha que permitir um fácil estacionamento, e como tal foi estudado de forma a poder ser “estacionado de frente”, isto é perpendicularmente ao eixo da via, ao contrário dos outros carros que, devido às suas grandes dimensões (essencialmente veículos familiares, de 4 ou 5 lugares), tem que estacionar paralelamente ao eixo da via. Para isto, foi logo definido que a frente do carro teria que facilmente se sobrepor ao passeio e, da traseira ao eixo da frente, media apenas 1,6 m, pouco mais do que um utilitário familiar tem de largura, Figura 2.1. Nesta fase, foi ainda estudado qual seria o motor a ser utilizado, tendo mesmo se pensado em pequenos motores de produção nacional, visto que o objetivo era que o veículo fosse exclusivamente, ou quase, de produção portuguesa. Sendo sabida a fraca potência dos motores disponíveis e por questões de custos, foi pensado inicialmente num veículo com apenas 3 rodas. O primeiro veículo surgiu em conjugação com a Famel, empresa conceituada em termos de motores a dois tempos de baixa cilindrada e com experiência em outros triciclos. Foi testado inicialmente um motor de 50 cc, mas cedo se percebeu que a potência era insuficiente. Foi então que surgiu a parceria com a Casal, sendo utilizado um motor de 125 cc, que também não correspondeu às necessidades. Foram ainda testados mais alguns motores de moto, nomeadamente dos espanhóis da Sanglas, e dos japoneses representados pela Yamaha e Honda, entre outras, em cilindradas de 250 cc e 360 cc, tanto a dois como a quatro tempos, com potências inferiores a 30 cv. Estes motores tinham um elevado consumo e não permitiam uma performance aceitável, nem a fiabilidade esperada, não estavam ainda dotados de arranque elétrico o que era um problema para um automóvel.



Figura 2.1 - Estacionamento perpendicular ao eixo da via, excede um pouco a largura de um utilitário normal; in “Santos T. T., O Conceito, Sado/550 – O Microcarro Português, 2013”.

Foi, então, que se mudou a abordagem e se pensou num motor que permitisse um desempenho aceitável para um veículo de quatro rodas, visto que este oferecia mais estabilidade, que era necessária devido ao aumento de potência, e oferecia uma visão comercial que certamente daria um maior valor ao Sado se este fosse projetado com quatro rodas em vez das três inicialmente pensadas. Dessa forma foram estudados motores a quatro tempos que não carecessem das modificações que eram necessárias pelos motores de moto. Então, começou o estudo por motores de 500 cc de modo a fazerem face ao aumento de peso proveniente da alteração estrutural implicada pela alteração das três para as quatro rodas. O mercado japonês, por esta altura, já começava a marcar bastantes pontos, com motores automóveis baratos e bastante fiáveis como o caso daqueles que nessa época foram utilizados em conceituadas marcas como o caso da Datsun (atual Nissan), Toyota, Honda, Lexus entre outras, e que ainda nos dias de hoje continuam as marcas japonesas a ser reconhecidas como as mais fiáveis do mundo. Num artigo recente, publicado online, é possível ler que nos finais de 2013 as marcas mais fiáveis do mundo continuavam a ser as japonesas, onde é afirmado que no topo da fiabilidade temos Lexus, Toyota e Acura seguida da Audi a primeira marca europeia do ranking, e é possível verificar que nas primeiras dez marcas automóveis, sete são japonesas (Rodrigues, 2013).

Foi, então, que se escolheu o motor AB 20 da Daihatsu com 547 cc, que teria um custo inicial mais elevado que os motores de moto anteriormente testados, mas oferecia a fiabilidade, desempenho e baixos consumos que eram esperados de um automóvel, de forma a poder satisfazer os clientes a longo prazo e não apenas com um custo de aquisição do veículo o mais baixo possível. Para justificar ainda mais a utilização deste motor, este incluía já a caixa de velocidades completa o que facilitava bastante a construção do Sado.

A segunda fase do Projeto, entre 1979 e 82, consistiu em detalhar, fabricar, testar e desenvolver, todos os aspectos do veículo, de modo a garantir a sua produção em termos economicamente viáveis e uma utilização simples, fiável e económica. A esta fase é atribuída a designação de desenvolvimento do produto.

Nesta fase realizaram-se vários testes dinâmicos de forma a se conseguir a homologação do veículo. Após serem consideradas várias hipóteses, optou-se, para a estrutura do veículo, por um chassis tubular em aço e com a carroçaria em poliéster não saturado, reforçado com fibra

de vidro, que permitia obter a rigidez necessária e uma resistência à corrosão excelente aliadas a um baixo custo para as séries limitadas que foram feitas. De modo a evitar demasiados desperdícios de fibra de vidro, e a tornar o mais rentável possível o processo, é possível verificar as amplas superfícies lisas presentes na carroçaria, Figura 2.2, com poucos detalhes, mas certamente levando a uma mais simples e rápida construção. Afinal, os objetivos para este veículo sempre foram a fiabilidade, simplicidade, os baixos consumos e o mais baixo custo de fabrico/aquisição possível e essas características estavam e iriam ser meticulosamente respeitadas.



Figura 2.2 - Simplicidade da carroçaria do Sado/550; in
 “<http://rodasdeviriato.blogspot.pt/search/label/Sado%20550>, consultado em 2016-03-25, 15:06”.

Um dos principais mentores do projeto, Carlos Galamba, que desde início tinha sido a favor da ideia de o veículo ser projetado para possuir quatro rodas, quis também manter-se fiel à simplicidade que achava necessária para este projeto e tentou simplificar o mais possível a carroçaria. Desta forma, e com o menor número de detalhes possíveis, de grosso modo, temos uma parte superior (carroçaria ou caixa), uma parte inferior (chassi ou plataforma), o capot, as portas, e os detalhes necessários para esconder juntas e ligações da vista.

Foi então realizado o estudo da viabilidade económica sobre a produção em série para este veículo, pois um projeto que não tenha viabilidade económica não tem “pernas para andar” a médio/longo prazo. Foram testadas em condições idênticas às reais as limitações que iriam enfrentar e foram-se estabelecendo melhorias e obtendo o rigor necessário para garantir a fiabilidade do automóvel como um todo, naturalmente com muitos ensaios em condições idênticas às de funcionamento, apesar dos limitados meios que eram postos à disposição.

Os responsáveis do projeto sempre acompanharam de perto a evolução de todo o processo, nomeadamente nos diversos testes que foram feitos ao veículo como um todo e também praticamente peça a peça com a presença dos futuros fabricantes de componentes. Era

sabido que não tínhamos uma cultura automobilística ainda bem enraizada, de modo que o mercado era servido de forma bastante limitada, em que eram feitos componentes recorrendo a métodos e a máquinas tradicionais, de forma a colmatar as avarias e falhas que iam aparecendo nos automóveis das marcas estrangeiras, e não eram capazes de servir uma crescente produção em série de uma nova marca que merecia peças fiáveis, em bastante quantidade e celeridade suficiente, para não obrigar à paragem do processo de construção do Sado. Isto revelou-se um grande entrave futuro visto que muitas vezes era necessário procurar em diferentes fornecedores peças que iam faltando aqui e ali, já que não haviam grandes *stocks*, nem essa preocupação até então, e a produção era demasiadas vezes interrompida, impedindo dessa forma o aperfeiçoamento e a rentabilidade que é esperada do processo de produção automóvel em que todos os minutos e segundos contam. Assim sendo, o ritmo de fabrico não era apenas gerido pelas condições da Entrepósito Máquinas e da sua linha de montagem, mas do mercado de componentes que não tinha condições para servir o novo carro com a velocidade e organização esperada. Desta forma os planos de entrega, naturalmente, não eram muitas vezes respeitados e com tantas dificuldades a produção sequencial era cada vez mais um sonho difícil de realizar.

Desde o início do projeto até se lançarem os primeiros veículos para venda já tinham passado sete anos, como tal havia a necessidade de começar a vender os primeiros exemplares, na procura de obter algum retorno financeiro, após um enorme investimento em testes e estudos e de forma a ter algum *feedback* por parte dos compradores, de forma a poder melhorar os aspetos cruciais. Dessa forma mesmo tendo sido as primeiras unidades já comercializadas, continuavam a ser melhorados certos aspetos que eram considerados relevantes e como tal, os modelos não eram todos iguais porque foi necessário perceber as questões que iam sendo levantadas e alterando aqui e ali. Lamenta-se o facto do Sado ter começado a ser vendido sem estar totalmente preparado para isso, e servir um público com algumas limitações que foram sendo aperfeiçoadas com as queixas que iam aparecendo.

Naturalmente vários protótipos foram feitos até se chegar ao produto pré-final, digo pré-final porque na verdade o Sado já depois de começar a ser vendido, foi continuamente melhorado tentando colmatar as falhas que iam sendo identificadas. Assim fala-se em pelo menos 3 grupos de protótipos. Relativamente ao modelo final a primeira geração, já com o motor Daihatsu, era mais estreita, tinha menos cerca de 10 cm de largura, era portanto menos espaçosa, a direção e os travões eram bastante diferentes dos mais recentes. O vidro da frente era plano, e tinha apenas um único braço limpa pára-brisas. Tinha dois pequenos vidros triangulares à frente, Figura 2.3. O tablier tinha apenas duas covas e a zona central era mais alta onde se situava todo o painel de instrumentos.



Figura 2.3 - Primeiros Protótipos; in “<http://www.jcle.pt/sado550/>, consultado em 2016-03-29, 17:43”.

Na segunda série de protótipos melhoraram-se os resultados de travagem em 50%, o pára-brisas passou a ser curvo, eliminaram-se os pequenos vidros triangulares junto às portas, e aumentou-se o tamanho das portas para facilitar o acesso ao automóvel.

Na terceira geração, o vidro traseiro ficou mais pequeno, de modo a esconder o conteúdo da bagageira, o tablier foi redesenhado e as portas foram novamente aumentadas, facilitando ainda mais a entrada e saída do veículo, e foram retiradas as forras das portas. No exterior alteraram-se alguns detalhes estéticos e aerodinâmicos do carro, arredondamentos das arestas e a alteração dos painéis inferiores da carroçaria, aparecendo um defletor traseiro para proteger mais o depósito de combustível, bem como um dianteiro onde se colocou a chapa de matrícula.

As várias modificações foram sendo testadas, tal como se pode ver na Figura 2.4, para que fosse avaliado o comportamento de cada um dos componentes e a pouco e pouco ir melhorando aqueles em que, por uma razão ou outra, não se mostravam fiáveis o suficiente, e muitas vezes após as melhorias eram novamente realizados testes para verificar se o componente já correspondia ao esperado. Foram, então, feitos uma série de testes que alongou muito o projeto, mas que se tornou indispensável para se atingir o nível de rigor que se conseguiu.



Primeiros protótipos



Primeiros protótipos

Figura 2.4 - Testes que foram realizados com os primeiros protótipos; in “Santos T. T., O Conceito, Sado/550 – O Microcarro Português, 2013”.

Concluído o “Projeto Ximba”, projeto que levou ao aparecimento do Sado, verificou-se que quase 70% dos clientes foram organizações, utilizando o veículo como “ferramenta de trabalho”, para ser utilizado essencialmente em ambientes citadinos ou suburbanos, o que prova a eficiência destes veículos neste tipo de ambientes, pois eram veículos ágeis e com baixos consumos. Equipou frotas de grandes empresas como os CTT, EDP, TLP, como é possível ver na Figura 2.5, bem como de pequenas empresas de distribuição. O preço de aquisição do Sado, devido às limitações anteriormente indicadas, essencialmente nas linhas de montagem, acabava por não ser muito inferior a reconhecidos automóveis da concorrência como o Citroen 2CV, de 4/5 lugares, mas que tinha características diferentes do Sado, no entanto não seria muito superior ao preço de algumas motos.



Figura 2.5 - Símbolo dos CTT ainda é visível em alguns dos Sado/550; in “<http://1140tv.blogspot.pt/>, consultado em 2016-03-25, 09:39”.

Apesar das referidas limitações e insucessos do Sado, certamente nem tudo foi mau. Tratou-se de uma iniciativa nacional que deve ser enaltecida tendo em conta as dificuldades da época, e a qual estimulou diversas áreas, nomeadamente a investigação, o desenvolvimento de projeto, o design e certamente “obrigou” algumas empresas de componentes a alterarem as suas estratégias de produção de peças de forma a melhorarem o rigor e a produtividade contribuindo fortemente para o desenvolvimento e competitividade dessa área da economia.

É possível ler numa revista da época (ACP, 1982) que o Sado se pode tornar num “caso sério”, visto que revela um desempenho adequado para a circulação na cidade para quem anda acompanhado por no máximo uma pessoa, tem consumos bastante baixos, de fazer inveja a muitos automóveis dos dias de hoje (4 a 4,9 litros por cada cem quilómetros), é fácil de estacionar por mais congestionados que estejam os espaços, e possui a mobilidade necessária para se desembaraçar das situações que enfrenta, bem como tem um motor que faz face às diversas rampas, sem grandes dificuldades, que aparecem em cidades como Lisboa e que obrigam muitos outros automóveis com mais que os simples 28 cv a fazerem uso da caixa de velocidades de modo a obterem binário suficiente. É ainda feita referência aos bons travões, que apesar de serem de tambor mostram um bom desempenho. Apesar do seu aspeto, diminuto, o Sado é uma surpresa, é capaz de suscitar a curiosidade de grande parte das pessoas que tem o privilégio de o ver.

No mesmo artigo dessa revista é ainda feita referência ao espaço que o Sado, surpreendentemente, apresenta no seu interior, apesar dos seus apenas 2,36 m de comprimento, é possível esticar as pernas e estar confortavelmente instalado. A posição dos pedais, do seletor de velocidades e do travão de mão é quase incensurável. Relativamente ao painel de instrumentos nada do que é imprescindível falta, fica feita a única crítica à posição do seletor de luzes que está afastado do volante o que dificulta a vida do condutor quando pretende dar sinal de luzes. Faz-se ainda referência à ausência de alguns cuidados nos acabamentos, mas que se trata de um automóvel para um fim bastante específico, e em que a estética ou qualidade nos pormenores nunca foram a primeira coisa a ter em linha de conta. “A versão que há chega perfeitamente – e insistimos, não envergonha ninguém: há pior em carros de preço mais elevado...”

É, por último, feita referência ao conforto interior, em que mesmo quando foram atravessados pisos de calçada, o que se sente dentro do carro é relativamente pouco tendo em conta que é um automóvel leve e pequeno, e está ao nível dos outros automóveis. No asfalto o carro tem um conforto totalmente satisfatório.

Carroçaria

Ao conceber a carroçaria para o Sado 550, Carlos Galamba teve em conta que os detalhes, certamente esteticamente interessantes, não eram, no entanto, relevantes para o objetivo para o qual este automóvel estava a ser concebido. Para além de se pretender evitar despesas de fabrico desnecessárias, a simplicidade da produção também era outro dos principais objetivos. O automóvel foi desenhado para ser prático e nunca foi a sua formosura uma preocupação. Era essencialmente uma “ferramenta de trabalho”, com consumos bastante interessantes para a desenvoltura apresentada.

A carroçaria sempre foi estudada para ser concebida em resina de poliéster não saturado, reforçada com fibra de vidro, que apresenta a enorme vantagem de já vir acabada, neste caso sempre a branco. Apresenta um bom comportamento em caso de pequenas colisões, tem uma boa resistência à corrosão e é reparável com baixos custos e facilmente no caso de acidente. A carroçaria apresenta seis partes distintas:

O habitáculo, peça única, na parte superior em resina de poliéster não saturada reforçada com fibra de vidro, que integra uma estrutura de segurança tubular em aço, invisível na própria carroçaria e tem por função o suporte do tablier, portas, vidros e depósito de combustível.

A plataforma, peça única, inferior em resina tendencialmente reforçada com fibra de vidro, da qual fazem parte os apoios do chassi, cavas de roda, apoios de bancos, apoios de para-choques, apoios de guarda-lamas, blocos de pedais e caixa de velocidades.

O *capot*, peça única, móvel, em resina de poliéster não saturada reforçada com fibra de vidro, onde se integra o reforço interior, o suporte de insonorização, dobradiças, e fecho de segurança.

As duas portas, peças únicas, em resina tendencialmente reforçada com fibra de vidro, móveis, onde se integram as dobradiças, fechos, puxadores, painéis e vidros de correr.

Os dois para-choques, peças únicas, fixas, em resina de poliéster não saturada reforçada com fibra de vidro, simétricas, aplicadas na plataforma, integram piscas da frente e refletores traseiros.

A grelha frontal, peça única fixa em resina de poliéster não saturada reforçada com fibra de vidro, rede metálica central do tipo alveolar, aplicada na estrutura de fibra que suporta e recebe os dois faróis (Santos T. , 2005; Santos T. T., 2013).

Interior

Relativamente à habitabilidade pode-se dizer que o automóvel tem lotação para duas pessoas, tem um espaço satisfatório, bancos com um desenho clássico, forrados a napa, são reguláveis na posição longitudinal, sendo que facilmente é encontrada uma posição cómoda. O acesso ao veículo é bom, ambos os bancos recostam para a frente, no entanto não é fácil colocar alguns objetos maiores atrás dos bancos, onde se localiza a bagageira.

O tablier é simples, mas tem o que é essencial, na frente do condutor está situado o painel de instrumentos, enquanto todo o resto do espaço é ocupado por um útil porta-objetos. Em baixo no centro, está localizado o cinzeiro, botão para o esguicho do limpa-vidros, o interruptor das luzes, o canhão para colocar a chave de ignição, e um espaço para colocar um rádio. O painel de instrumentos inclui velocímetro com totalizador de quilómetros, indicador do nível de gasolina, termómetro da água do radiador, indicadores dos piscas e dois avisadores luminosos, pressão de óleo insuficiente e bateria sem estar a ser carregada pelo alternador. O volante é desportivo, foi construído pela extinta casa “De Moura”, tem 3 raios metálicos perfurados, sem acabamento, em alumínio, diâmetro de 14”, buzina no centro com o logótipo “De Moura”, o aro é de espessura considerável, forrado com pele sintética. Na coluna de direção existem 3 alavancas, à direita o limpa-vidros de apenas uma velocidade, e à esquerda os piscas e o seletor de médios/máximos. A alavanca das velocidades é pequena, já que está montada numa posição elevada devido ao túnel criado para a caixa de velocidades e para o veio de transmissão, Figura 2.6.



Figura 2.6 - Interior do Sado/550; in “<http://rodasdeviriato.blogspot.pt/search/label/Sado%20550>, consultado em 2016-03-25, 15:06”.

O Sado não foi concebido com climatização até surgirem os modelos de 1984, que tinham um pequeno aquecimento, até então a única forma de ventilar era abrindo manualmente as janelas, com dois vidros de correr, facilmente o carro ficava embaciado no inverno, altura em que as janelas estão mais vezes fechadas, era necessário recorrer a um pano para ir limpando os vidros, ou então sofrer as consequências de abrir as janelas em dias chuvosos.

A visibilidade é um grande ponto a favor, já que temos grandes superfícies vidradas, embora no ângulo morto dos pilares traseiros, pilares B, essencialmente do lado do passageiro, dificulta a visibilidade nessa direção, até porque não existe retrovisor lateral do lado do passageiro. Os últimos modelos apresentam pequenas janelas nesses pilares que pouco resolveram este problema.

Mecânica

O motor AB20 da Daihatsu com 547 cc, é a 4 tempos, constituído por 2 cilindros em linha, montado longitudinalmente, em posição inclinada. Este motor equipava carrinhas substancialmente mais pesadas que o Sado, Figura 2.7. O bloco é em ferro fundido, enquanto a cabeça é em liga de alumínio. A distribuição é feita por válvulas à cabeça. Este motor é menos equilibrado que um com 4 cilindros, e, portanto, utiliza 2 veios de equilíbrio, um de cada lado da cambota, e rodando no sentido inverso desta, permitindo equilibrar as forças de inércia de forma a obter um motor mais suave.



Figura 2.7 - Carrinhas Daihatsu Wide55 e Hi-Jet 550, equipadas com o motor AB20 da Daihatsu; in “<http://www.jcle.pt/sado550/>, consultado em 2016-03-29, 17:43”.

A aceleração do Sado, não deixa ficar ninguém mal, já que apesar de não ter um motor muito potente, 28 cv, tem pouco peso, o que leva a uma relação peso potência de 17,86 kg/cv, tem um período de aceleração dos 0 até aos 60 km/h excepcional, e consegue atingir os 100 km/h em 19,2 s, valor banal para os utilitários daquela época com “1000 cc”.

A velocidade máxima num carro que foi criado para a circulação urbana e suburbana como este, não será alvo de grande preocupação, até porque velocidades elevadas para um veículo com estas dimensões e peso certamente o tornariam inseguro. A velocidade de ponta ronda os 110 km/h, sendo que nos primeiros protótipos chegava muito próxima dos 130 km/h. No entanto, o carro vinha equipado com um limitador de velocidade, que tinha por função cortar a alimentação ao motor a partir dos 90 km/h.

A caixa de velocidades era montada longitudinalmente, de modo a transmitir a potência gerada pelo motor até às rodas traseiras, recorrendo a 4 velocidades sincronizadas para a frente e a marcha-atrás. A transmissão é feita através de um diferencial com engrenagens em espiral.

Com o aumento de potência desde os protótipos iniciais foi necessário melhorar-se substancialmente a capacidade de travagem do Sado. Do sistema de tambor de simples circuito passou-se para o de duplo circuito. A distribuição do esforço teve de ser alterada em face da nova distribuição de pesos e da posição do centro de gravidade. Nas travagens bruscas sente-se a transferência de massas do eixo traseiro para o dianteiro, e depois a sua reposição brusca.

Eixos rígidos, atrás e à frente, separados por 1,40 m, garantem um paralelismo entre as rodas, evitando variações de *camber* (inclinação da roda de um veículo relativamente ao plano vertical) e consequentes alterações no comportamento do carro, bem como economia construtiva e de manutenção. Os amortecedores são hidráulicos de duplo efeito com molas quarto-elípticas com seis lâminas à frente e sete atrás, com um curso razoável.

Sistema de pinhão e cremalheira, o braço de saída da cremalheira não atua diretamente nos braços da direção, mas sim através de um pendural, minimizando as variações de direção com os movimentos da suspensão.

A largura dos pneus teve em conta o equilíbrio do carro e o bom acerto das transferências de peso e flexibilidades relativas das suspensões. Apesar do seu reduzido tamanho oferecem segurança. No entanto, foram testados pneus mais largos como forma de atenuar o impacto dos ventos na estabilidade. As jantes são em aço prensado, desmontáveis (tipo scooter), não possuindo gola, em caso de furo o pneu não sai da jante, sendo que tirar a câmara de ar é por isso muito facilitado (Santos T. , 2005; Santos T. T., 2013).

Com um motor de pequena cilindrada e potência moderada há sempre a tendência para o utilizar acima do seu “regime económico”. O consumo médio é da ordem dos 5,3 l/100 km). O consumo a uma velocidade estabilizada de 60 km/h é de 3,5 litros por cada 100 km (Motorizado, 1982).

Considerações Finais

O Sado não satisfaz a nível de ruído, devido ao seu motor e à dimensão dos pneus. Foi posto à venda em 1982 por cerca de 262 contos (moeda da altura e que devido à inflação torna difícil a comparação com o mercado atual), na mesma época um Fiat 127 custava cerca de 435 contos e o Ligier JS4 (cidadino de 2 lugares com 50 cc) custava cerca de 311 contos, mas tinha como mostra a campanha da Ligier na fórmula 1, e os que privilegiavam a família preferiam o Citroen 2CV, capaz de transportar 4/5 pessoas e com um custo de aquisição idêntico ao do Sado (Santos T. , 2005; JCLE, 2006). A produção não dava escoamento para as encomendas que eram feitas. Eram essencialmente empresas que pretendiam investir no automóvel português, certamente para também ajudar o próprio mercado luso e porque realmente era um veículo criado para o desempenho em cidade que era o que normalmente as empresas necessitavam. O Sado não é o brinquedo que a sua aparência faça supor, é um exemplo da engenharia automóvel nacional de que nos podemos orgulhar, um excelente projeto, muito bem concebido para se deslocar em cidade, que foi criado de raiz.

Devido à sua limitada produção, 272 unidades (Marques, 2013), é um veículo quase desconhecido da maioria das pessoas que, por vezes, o comparam, depreciativamente, aos “sem carta”. Apesar de já ter mais de 30 anos, ainda existem Sado por aí, nem sempre em branco com para-choques preto, cor com que foi comercializado (Santos, Sado 550 - O automóvel português produzido em série, 2005).

2.2 O chassi

O chassi é a espinha dorsal do automóvel. É a partir do chassi que se vai montando todos os outros componentes do automóvel e é o elemento que está sujeito a maiores esforços. É, então, o principal responsável por garantir a integridade estrutural do veículo. O design do chassi, bem como os materiais que são utilizados neste elemento preponderante do veículo, foram evoluindo seja de forma a ir de encontro a maior segurança ou a menor peso. Por todas estas razões facilmente se compreende que investir tempo e esforço no chassi é essencial para se chegar a um automóvel que reúna as características mais importantes, segurança e peso (sendo sobejamente conhecido que quanto menor o peso do automóvel melhor o seu desempenho e manobrabilidade, menor o seu consumo).

Os primeiros chassis eram feitos em aço, sobredimensionados, pois não havia grande capacidade de cálculo. Então, exagerava-se na estrutura de modo a dar garantias de segurança e resistência, o que levava à utilização de motores exagerados para o veículo, e a sua potência e consumo ficavam comprometidos pelo excesso de peso. O aço era um material acessível e reciclável (por fundição), era já utilizado em diversas outras estruturas e, como tal, a sua escolha foi natural, sendo ainda desde sempre considerado um material muito resistente mecanicamente, tendo em conta o seu baixo custo relativo.

Foi-se percebendo que o excesso de peso era um fator preponderante para baixar o desempenho do automóvel, e que demasiado material e custos estavam a ser empregues na construção do chassi, desnecessariamente. Dessa forma foi-se reduzindo a quantidade de aço que era usado no chassi de modo a obter melhores desempenhos e menores custos de fabrico. Tal facto despoletou um avanço necessário na redução de peso nos automóveis de competição, que cedo despertou o interesse não só do público, mas também das marcas automóveis de modo a ganharem projeção internacional.

Mais tarde começa a surgir o problema do aumento dos preços dos combustíveis aliados à preocupação ambientalista, seja da poluição gerada pelos motores de combustão interna, seja pela exploração desenfreada dos combustíveis fósseis, não renováveis, e ao surgimento de impostos cada vez mais pesados. As diversas crises económicas a escalas mundiais levaram a pensar na redução do custo imediato no material desnecessário ao fabrico do automóvel, bem como a pensar a longo prazo, ou seja, tentar baixar o peso para reduzir o consumo, característica que tende a ser cada vez mais apreciada, já que sempre que se fizer uma viagem se pouparem alguns centimos, ao fim de milhares de quilómetros é fácil perceber a quantidade de dinheiro que se poupa. E isso começou a ser uma preocupação assim que surgiram as primeiras subidas absurdas dos preços dos combustíveis. Era, então, por esta altura necessário trazer para o quotidiano materiais menos densos e igualmente rígidos e resistentes (relativamente ao aço), de modo a originar chassis cada vez mais leves. Apareceram então as ligas de alumínio.

A 30/06/1953, na linha de montagem da Chevrolet, em Flint no estado de Michigan (EUA), saía o primeiro automóvel fabricado em GFRP – Glass Fibre Reinforced Plastic (PRFV – Plásticos Reforçados com Fibra de Vidro), o Chevrolet Corvette, Figura 2.8. Neste ano foram apenas produzidos 300 destes veículos.



Figura 2.8 - Chevrolet Corvette com a carroçaria em fibra de vidro; in “http://www.carroantigo.com/portugues/conteudo/curio_primeiros.htm, consultado em: 2016-04-02, 15:30”.

O primeiro automóvel a utilizar um chassi em CFRP – *Carbon Fibre Reinforced Plastic*, data de 1981, foi um automóvel da fórmula 1, McLaren MP4/1, Figura 2.9, com o propósito da redução de peso de forma a conseguir melhor desempenho.



Figura 2.9 - McLaren MP4/1, primeiro automóvel com chassi em fibra de carbono; in “https://pt.wikipedia.org/wiki/McLaren_MP4/1, consultado em 2016-04-02, 16:00”.

Entre 1993 e 1998 são produzidas 106 unidades de outro McLaren, que foi o primeiro “carro de rua” a utilizar a fibra de carbono no seu *monocoque* (estrutura rígida que faz com que chassi e carroçaria se comportem como um só). O McLaren F1, Figura 2.10, tinha a ambição

de conseguir desempenhos brilhantes, para um carro naturalmente aspirado (sem sobrealimentação), e conseguiu esse feito de forma categórica, ao ser ainda hoje reconhecido como um ícone dos supercarros. Apesar das suas grandes dimensões (4,29 m de comprimento, 1,82 m de largura, 1,14 m de altura) o McLaren F1 pesa apenas 1.140 kg, tendo ainda em conta que utiliza um grande V12 de 6.100 cc.



Figura 2.10 - McLaren F1, primeiro automóvel de rua com chassi monocoque totalmente em fibra de carbono; in “<http://www.autoentusiastascClassic.com.br/2013/11/mclaren-pioneira-na-fibra-de-carbono.html>, consultado em 2016-04-02, 16:30”.

Em 2004, surge nas corridas de fórmula 1 o Renault R24, Figura 2.11, com um chassi híbrido, moldado em CFRP, e com estrutura ninho de abelha em alumínio. Consegue pesar apenas 605 kg. No entanto, nesse ano os grandes prémios de fórmula 1 foram dominados pelo Ferrari F2004 de Michael Schumacher e Rubens Barrichello, que venceram 15 das 18 provas, enquanto o Renault R24 venceu apenas uma.



Figura 2.11 - Renault R24, com chassi híbrido, 2004; in “https://en.wikipedia.org/wiki/Renault_R24, consultado em 2016-04-03, 10:00”.

Em 2012, a Lamborghini lança um dos modelos mais mediáticos e excêntricos da sua história, o Aventador. Com o primeiro modelo a ser o Lamborghini Aventador LP700-4 equipado com um V12 de 700 cv, capaz de atingir os 100 km/h nuns impressionantes 2,9 s. Uma grande parte do segredo para esse desempenho passa pelo seu peso, de apenas 1575 kg

para os seus 4,78 m de comprimento, 2,26 m de largura e uma altura de 1,14 m. O seu chassi *monocoque*, totalmente em compósito à base de fibra de carbono, Figura 2.12, permite obter uma estrutura leve e extremamente robusta, com uma resistência à torção que garante uma segurança incrível. Na produção do chassi várias camadas de fibra de carbono são impregnadas com uma resina de epóxico, *Araldite*®, com o apoio da *Huntsman Advanced Materials*, com um método adaptado para a circunstância e designado por “RTM-Lambo”. Os componentes necessitam ser posteriormente endurecidos num autoclave a altas temperaturas e sobre pressão. O processo é dispendioso e complexo, mas a construção de um supercarro deste nível justifica isto e os custos da produção deste chassi são “absorvidos” pelo custo global do carro que é naturalmente excêntrico, a Lamborghini prevê concluir as vendas do Aventador, Figura 2.13, nas 4000 unidades, enquanto foram produzidas 4099 unidades do modelo Murciélago.



Figura 2.12 - Chassi do Lamborghini Aventador LP700-4, totalmente em fibra de carbono; in “<http://www.lamborghini.com/en/models/aventador-lp-700-4/innovation-technology/chassis/>, consultado em 2016-04-03, 16:00”.



Figura 2.13 - Lamborghini Aventador LP700-4; in “<http://www.lamborghini.com/en/models/aventador-lp-700-4/innovation-technology/chassis/>, consultado em 2016-04-03, 16:00”.

Em 2013 a BMW lança a série i, com o modelo i3 e em 2014 o modelo i8. O BMW i3, Figura 2.14, de motorização elétrica, apresenta um design bastante arrojado, típico dos automóveis elétricos, em que recorre a vários materiais recicláveis para o seu interior, e a um chassi *monocoque*, em CFRP para compensar o excesso de peso das baterias, e de modo a estender ao máximo a autonomia das baterias bem como do desempenho do carro. A BMW optou por colocar as baterias no “chão” do i3, de modo a baixar o centro de gravidade do automóvel para lhe conferir maior segurança e maior agilidade, bem como a criação do chassi em CFRP confere, para além de uma redução de peso enorme, uma elevada resistência mecânica e rigidez capaz de manter praticamente intacta, no caso de acidente, a zona onde ficam os passageiros, e por esse motivo é autodenominado *Life Module*, Figura 2.15.



Figura 2.14 - BMW i3; in “http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/360_electric.html, consultado em 2016-04-06, 08:30”.



Figura 2.15 - BMW i3, arquitetura LifeDrive em que separa o Life Module, parte de cima, do Drive Module, parte inferior onde tem a suspensão, rodas e bateria; in “<http://www.bmw.com/com/en/insights/corporation/bmwi/concept.html>, consultado em 2016-04-06, 08:30”.

3 Materiais compósitos

Um material que resulte da combinação de dois ou mais materiais, distintos, não solúveis entre si e com propriedades sinérgicas designa-se material compósito. Nos materiais compósitos é possível distinguir um reforço e uma matriz, Tabela 3.1, de modo a se conseguir obter um material coeso, com melhores propriedades que o reforço ou matriz teriam de forma isolada. O reforço tem por função estabelecer a resistência mecânica e a rigidez do compósito, enquanto a matriz tem por função proteger o compósito contra o meio envolvente, manter a integridade deste e proteger o compósito durante a sua utilização (Pardal, 2016). Os compósitos podem classificar-se segundo vários critérios, sendo a base da matriz um dos critérios mais utilizados. Assim, podemos classificar os materiais compósitos como sendo de matriz polimérica (se a sua matriz for à base de polímeros), metálica (como por exemplo ligas de alumínio, magnésio ou titânio), cerâmica (no caso de a matriz ser à base de carbonetos de silício ou boro ou nitreto de alumínio) ou cimentosa (cimento, no caso de betão armado) (Pardal, 2016). A facilidade de processamento e a baixa densidade dos polímeros fazem com que os compósitos de matriz polimérica sejam os mais utilizados, versáteis e, portanto, interessantes do ponto de vista da engenharia.

Tabela 3.1 - Pares ligantes entre matriz e reforço, adaptado de Phillips (1989).

Fibra (Reforço)	Matriz	Par ligante (boa adesão)
Vidro	Fenol-formaldeído	Vidro/poliéster
Carbono	Melamina-formaldeído	Vidro/epóxido
Aramida	Poliéster insaturado	Vidro/silicone
Boro	Epóxido	Aramida/epóxido
Sílica	Silicone	Carbono/epóxido
	Poliamida	Boro/poliamida
	PBI	Boro/PBI
	Furano	

3.1 Reforço

Normalmente, os reforços são fibras, que apresentam uma alta resistência mecânica e alta rigidez numa dada direção. As fibras podem ser naturais, metálicas, inorgânicas ou orgânicas. As fibras mais valiosas, versáteis e interessantes, são as que têm menor densidade, pois permitem que sejam utilizadas em várias aplicações diferentes que requeiram um peso baixo e uma liberdade de design elevada, as mais utilizadas em matrizes poliméricas são as fibras de vidro e, mais recentemente, de carbono. O aço tem uma densidade superior à maioria das fibras numa ordem de aproximadamente 3 a 4 vezes mais, Tabela 3.2. A resistência específica é dada por σ_u/ρ , e tem em conta a capacidade de um material aguentar esforços axiais, por unidade de massa volúmica. O módulo específico, E/ρ , compara a rigidez específica dos materiais. Quando se procura um material para determinada aplicação em que é necessário ter em conta não só a resistência, mas também o peso, estas duas características tornam-se fundamentais para a escolha. Naturalmente, o custo do material e a facilidade de processamento, também serão decisivos para a escolha do material, visto que, poderão proporcionar uma maior economia, cabendo ao engenheiro utilizar os compósitos de forma a otimizar custos, dando-lhe as formas adequadas de maneira a preencher os requisitos necessários a determinada estrutura ou aplicação.

Tabela 3.2 - Propriedades de fibras e materiais convencionais, adaptado de Agarwal & Broutman (1980).

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tração, σ_u (GPa)	Densidade, ρ (-)	Módulo específico, E/ρ	Resistência específica, σ_u/ρ
Fibras:					
Vidro E	72,4	3,5	2,54	28,5	1,38
Vidro S	85,5	4,6	2,49	34,5	1,85
Carbono (alto módulo)	390,0	2,1	2,15	205,0	1,1
Carbono (alta resistência)	240,0	2,5	1,85	126,0	1,3
Boro	385,0	2,8	2,70	146,0	1,1
Sílica	72,4	5,8	2,19	33,0	2,65
Tungsténio	414,0	4,2	19,3	21,0	0,22
Berílio	240,0	1,3	1,83	131,0	0,71
Kevlar® 49	130,0	2,8	1,50	87,0	1,87
Materiais convencionais:					
Aço	210,0	0,34-2,1	7,8	26,9	0,043-0,27
Ligas de Alumínio	70,0	0,14-0,62	2,7	25,9	0,052-0,23
Vidro	70,0	0,7-2,1	2,5	28,0	0,28-0,84
Tungsténio	350,0	1,1-4,1	19,30	18,1	0,057-0,21
Berílio	300,0	0,7	1,83	164,0	0,38

3.1.1 Fibra de Vidro

As fibras de vidro, Figura 3.1, são o reforço mais utilizado em materiais compósitos de matriz polimérica. A designação fibra de vidro pode tanto ser utilizada para a fibra em si, como para designar o compósito. Na literatura estrangeira aparece várias vezes designada de forma abreviada por GFRP (*Glass Fibre Reinforced Plastic*) ou simplesmente por GRP (*Glass Reinforced Plastic*). A técnica mais comum para produzir fibras de vidro é o estiramento de vidro fundido, a cerca de 25 m/s, através de uma fieira, com cerca de 200 orifícios de dimensões precisas. Ao ser puxado rapidamente e continuamente a partir da massa fundida, o vidro é retirado em filamentos da ordem dos 3 a 24 μm em produção comercial, no entanto, entre 10 a 13 μm são os valores mais típicos. A temperatura de fusão depende muito da composição do vidro, mas por norma ronda os 1260 °C. As fibras de vidro são sujeitas a tratamentos superficiais à saída da fieira, que variam consoante o fim a que se destinam: um revestimento têxtil para o fabrico de tecidos sem risco de danificação da fibra; um revestimento plástico para permitir a compatibilização da fibra com as diferentes matrizes orgânicas existentes.

Segundo estudos recentes, fibras com teores alcalinos inferiores a 14% apresentam alterações menos significativas em contacto com agentes atmosféricos ou químicos desfavoráveis. Atualmente, pelo menos 3 tipos de fibras são produzidos sob a forma de fios, tipo E, S e R, Tabela 3.3. Os tipos S e R são produzidos a partir de vidros de alta resistência e são muito aplicadas na indústria aeronáutica.

Vidro-E – É a chamada fibra de vidro corrente.

Vidro-S – Uma fibra de vidro mais resistente e rígida originalmente desenvolvida para fins militares.

Vidro-R – É a versão comercial do tipo Vidro-S, usado para importantes aplicações estruturais.

Tabela 3.3 - Propriedades dos mais comuns tipos de fibra de vidro, adaptado de Moura *et al*, 2011.

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (-)	2,59	2,49	2,55
Módulo de Young (GPa)	73,0	85,5	86,0
Tensão de rotura (MPa)	3.400	4.580	4.400
Deformação na rotura (%)	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	5,0	2,9	4,0



Figura 3.1 - Fibra de Vidro.

3.1.2 Fibra de Carbono

Quando falamos em fibras de carbono estamos a falar de dois grupos, classificados de acordo com a percentagem de carbono na sua composição: para valores de carbono entre os 80 e 95% estamos perante as chamadas fibras de carbono, já as fibras de grafite apresentam teores em carbono que atingem os 99%. Estas fibras estão geralmente associadas a altos desempenhos mecânicos, baixa densidade e elevado custo e, como tal, são geralmente alvo de indústrias capazes de absorver estes custos e que necessitam de tais características específicas de grande qualidade, como a aeronáutica, a indústria espacial ou a automóvel, mais recentemente. As fibras de carbono são designadas na literatura estrangeira pela sigla CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Plastic*).

As fibras de carbono são bastante mais leves que o aço para o mesmo volume (conceito de massa volúmica), e apresentam propriedades mecânicas superiores, o que faz com que a opção pelas fibras de carbono seja preferível para a obtenção de estruturas mais leves. No entanto, os preços de obtenção das fibras de carbono são muito elevados e para já a fibra de carbono vai apenas satisfazendo os pedidos mais excêntricos, em determinadas aplicações específicas e que envolvam grandes verbas. Exemplos disso são os automóveis de alta gama ou automóveis de competição. Na indústria aeronáutica, são usadas no fabrico de asas e turbinas, devido à sua resistência a altas temperaturas. É ainda utilizada no fabrico de motores para foguetões e naves espaciais. Nas bicicletas de competição ou nas marcas mais conceituadas e modelos topos de gama, pode-se ver a fibra de carbono utilizada nos quadros, guiadores, selins, rodas, travões de disco e transmissões. É utilizada largamente na área da robótica, bem como no fabrico de equipamentos bélicos, até em coletes à prova de bala associada com a fibra de aramida, conhecida comercialmente por *Kevlar* (Abreu, 2009).

Atualmente a produção de fibras de carbono baseia-se na decomposição térmica de vários precursores orgânicos: a celulose, que permite obter as chamadas “*rayon fibers*”, o poliácridonitrilo (PAN), e o alcatrão “*pitch*”.

A produção a partir da celulose foi o primeiro processo a surgir, e exige enormes temperaturas na grafitização o que torna o processo demasiado caro e, ainda assim, leva à obtenção de fibras com baixas características mecânicas e, por isso, é cada vez menos utilizado. No entanto, o método foi sendo melhorado e, já se conseguem obter propriedades idênticas às obtidas pelos outros processos.

As fibras obtidas a partir do precursor de alcatrão apresentam vantagens essencialmente económicas e, como tal, é normalmente a opção tomada pela indústria automóvel. No entanto, apresentam propriedades mecânicas ligeiramente inferiores.

O precursor mais utilizado é o poliácridonitrilo. A matéria-prima das fibras de carbono, produzidas a partir deste precursor, é o polímero de poliácridonitrila, um material obtido a partir da polimerização de uma variação do acrílico. A grande vantagem dessa fonte é a alta concentração de carbono, uma vez que mais de 90% dos átomos do material são justamente disso. Durante a produção, o polímero é esticado e fica paralelo ao eixo das fibras, formando uma liga rígida e resistente (Hamann, 2015).

O processo representado esquematicamente na Figura 3.2 mostra as etapas comportadas pelo fabrico das fibras de carbono a partir do poliácridonitrilo:

1. Oxidação – as fibras são aquecidas até 300 °C numa atmosfera rica em oxigénio, levando à formação de uma estrutura reticular da cadeia molecular; nesta fase pretende-se eliminar o ponto de fusão das fibras;

2. Carbonização – a cadeia molecular é gradualmente aquecida até cerca de 1100 °C num forno de atmosfera neutra com o propósito de se obter somente átomos de carbono no final; as fibras obtidas apresentam boas características mecânicas e podem ser usadas posteriormente;
3. Grafitização – é o processo utilizado para se obter fibras com elevado módulo de elasticidade; numa atmosfera neutra realiza-se a pirólise das fibras, obtendo-se um elevado grau de orientação da estrutura que lhe confere maior rigidez;
4. Tratamento superficial – as superfícies são alteradas de forma a se conseguir elevada adesão entre fibras e resina. Este tratamento é feito numa atmosfera de ácido nítrico ou sulfúrico (Moura *et al*, 2011).

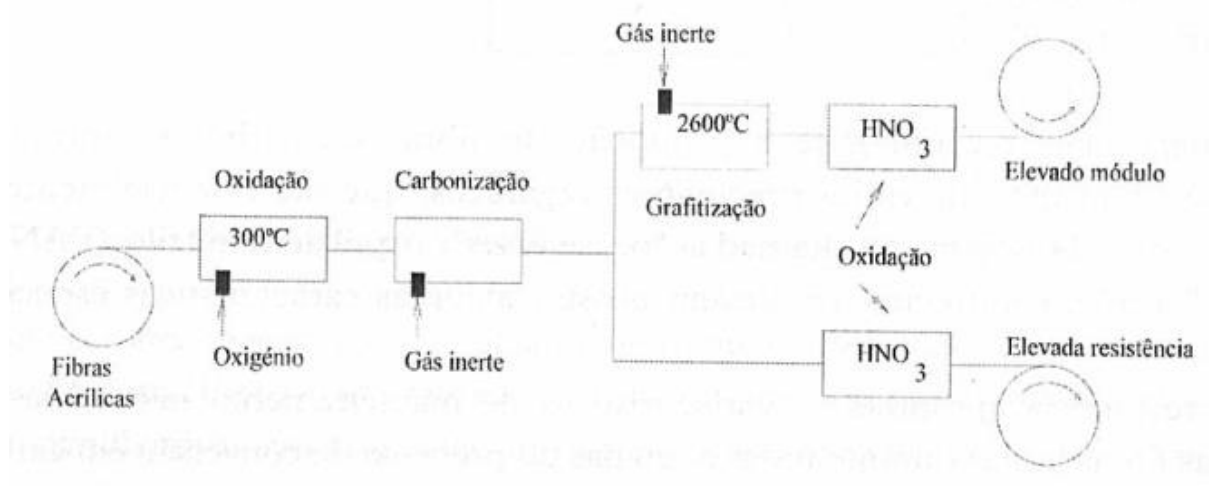


Figura 3.2 - Produção de fibra de carbono a partir do PAN (Moura *et al*, 2011)

A Reinforced Plastics, num artigo da autoria de Holmes (2014), disponibilizou um estudo online onde entre outras referências à utilização da fibra de carbono, mostra quais as áreas que mais consumiam este material em 2012, tendo por base 43.500 toneladas consumidas, Figura 3.3.

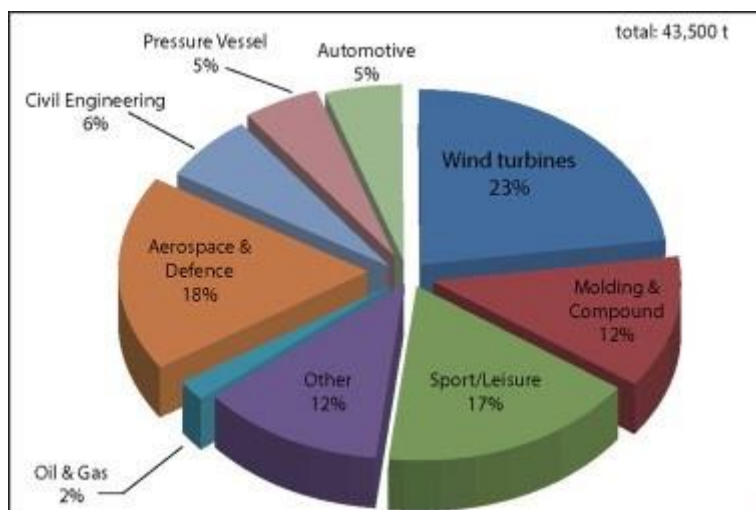


Figura 3.3 - Áreas que mais utilizavam a fibra de carbono em 2012; in “<http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/carbon-fibre-reinforced-plastics-market-continues/>, consultado em 2016-04-11, 23:17”.

3.1.3 Fibra de Aramida

As fibras aramídicas são produzidas a partir de poliamidas aromáticas, e surgiram em 1971. Altas propriedades mecânicas são obtidas devido ao alinhamento da cadeia do polímero com o eixo das fibras e da rigidez dos núcleos aromáticos, possui uma tonalidade amarela característica.

A solução do polímero é mantida a baixa temperatura (entre -50 °C e -80 °C), sendo depois extrudada a uma temperatura de aproximadamente 200 °C. As fibras aramídicas foram comercializadas pela primeira vez pela DuPont™, em 1972, que apresentou estas fibras com o nome que ainda hoje é reconhecido para estas, Kevlar®, e ainda o menos mediático Nomex®. No entanto, o mercado não se cinge apenas a esta empresa nem a estas marcas, mais tarde a Enke e a Teijin desenvolveram fibras idênticas.

Atualmente existem dois tipos principais destas fibras no mercado:

- Kevlar®29, Twaron® ou HM.50® (referência usada pela Teijin) são as fibras aramídicas padrão, com aplicações em materiais de baixo coeficiente de atrito e objetos de proteção pessoal;
- Kevlar®49 da DuPont ou Twaron HM® da Enke, com inúmeras aplicações exigentes, tal como cascos de barcos, automóveis de competição, estruturas de aviões, capacetes e coletes de proteção balística.

Apresentam excelente relação rigidez-peso, tensão de rotura elevada, boa resistência à fadiga e ao impacto, bem como bom amortecimento de vibrações, boas propriedades de isolamento elétrico. Possuem boa resistência a ácidos e álcalis. O seu coeficiente de dilatação é negativo ou próximo de nulo. Tem como contras a baixa resistência à compressão e à flexão, bem como elevada sensibilidade ao corte interlaminar. Esta desvantagem é normalmente associada à fraca ligação interfacial entre a matriz e as fibras, pelo que se desenvolveram diferentes tratamentos superficiais das fibras aramídicas para melhorar a ligação interfacial e a resistência à delaminação (Moura *et al*, 2011). Estas fibras não são tão quebradiças como as fibras de vidro ou carbono e podem ser facilmente tecidas num tear (Agarwal & Broutman, 1980). Na Tabela 3.4 são mostradas algumas propriedades mecânicas das principais fibras. É possível observar, na Figura 3.4, o aspeto da fibra de aramida.

Tabela 3.4 - Propriedades mecânicas de fibras de Aramida, adaptado de Moura *et al* (2011); Agarwal & Broutman (1980).

Propriedade	Kevlar®29	Kevlar®49	Twaron®
Densidade (-)	1,44	1,44	1,44
Módulo de Young (GPa)	62	124	60
Tensão de rotura (MPa)	2.760	3.620	2.600
Deformação na rotura (%)	3,6	1,9	3
Coeficiente de expansão térmica axial ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	-2,0	-2,0	-
Coeficiente de expansão térmica radial ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	60	60	-

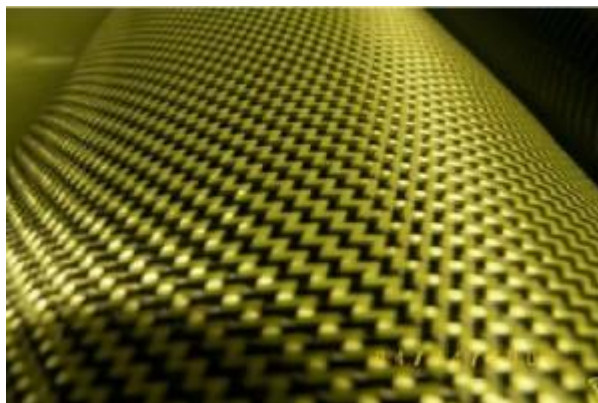


Figura 3.4 - Fibra de Aramida.

3.1.4 Fibra de Boro

As fibras de boro são bastante resistentes e rígidas, comparando com alguns materiais convencionais e com outras fibras. São obtidas a altas temperaturas em que se procura a deposição do tricloreto de boro, em vapor, sobre um filamento de tungsténio ou carbono com cerca de 10 a 12 μm de diâmetro, que formará o núcleo central da fibra (Moura *et al*, 2011). Este filamento de tungsténio é pesado (com um peso específico de 19,3), o que leva à obtenção de fibras de boro mais pesadas que as fibras anteriormente abordadas (Phillips, 1989). Após a deposição do boro obtém-se uma fibra com cerca de 100 a 200 μm de diâmetro final. No entanto, apresentam um módulo de elasticidade cinco vezes superior. Devido às fibras de boro apresentarem um elevado custo são aplicadas a áreas muito restritas como a aeronáutica. As fibras de boro também podem ser utilizadas em matrizes metálicas para produzir materiais capazes de serem utilizados a elevadas temperaturas (Moura *et al*, 2011). No entanto, o boro tem a particularidade de reagir com a matriz metálica, destruindo-se. Para contornar esta situação pode-se efetuar uma deposição final em vapor de carboneto de boro ou de carboneto de silício, que evita esta reação, esta fibra alterada designa-se por “Borsic” e pode ser usada com uma matriz de alumínio nas pás do rotor em motores a jato, utilizações semelhantes estão a ser estudadas na aviação (Phillips, 1989). Algumas propriedades destas fibras podem ser observadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas de fibras de boro em função do seu diâmetro, adaptado de Moura *et al* (2011).

Propriedade	100 μm	140 μm	200 μm
Densidade (-)	2,61	2,47	2,39
Módulo de Young (GPa)	400	400	400
Tensão de rotura (MPa)	3.450	3.450	3.450
Deformação na rotura (%)	0,7-0,9	0,7-0,9	0,7-0,9
Coeficiente de expansão térmica axial ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	4,9	4,9	4,9

3.2 Matriz

A matriz pode ser um metal, uma liga metálica, um cimento inorgânico ou vidro, ou um polímero natural ou sintético. A matriz que irá ser falada neste documento é de origem sintética, designada habitualmente por resina, e tem a função estrutural no compósito por transferir os esforços mecânicos para o reforço, por garantir maior tenacidade, resistência à fadiga e resistência à corrosão do compósito. A fibra deve ser rígida, ou seja, deve-se aproximar o mais possível da vertical, na curva do ensaio de tração e deve ter uma elevada resistência à tração. A matriz é menos rígida que a fibra, isto é, tem que ter menor inclinação na curva de tração e é menos resistente que a fibra, podendo atingir uma maior elongação na rotura, dessa forma é garantido que a fibra atinge a sua extensão máxima à sua força máxima, antes da matriz ceder, porque terá uma maior capacidade de alongamento, como se pode ver na Figura 3.5.

As matrizes de natureza polimérica dividem-se em duas categorias principais: termoplásticas e termoendurecíveis (Phillips, 1989).

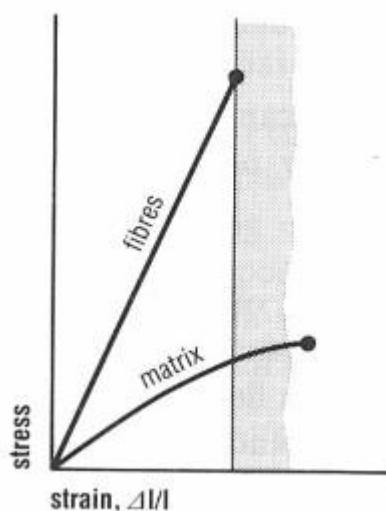


Figura 3.5 – Gráfico de tensão-alongamento das fibras e da matriz (Phillips, 1989).

Termoplástica

Este grupo de plásticos têm um elevado peso molecular. Quando se aquecem estes polímeros, as ligações macromoleculares individuais, sem qualquer reticulação entre si, que apenas mantém a sua posição à custa de ligações secundárias (forças intermoleculares), são quebradas e passa a existir mobilidade molecular o que permite a reconformação do polímero, devido ao seu amolecimento. Quando se arrefece, o polímero contrai, recupera as suas propriedades mecânicas originais, uma vez que diminui o espaço para a mobilidade molecular e como tal o polímero estabiliza nessa posição, dando lugar ao restabelecimento das ligações intermoleculares. Os termoplásticos, em geral, apresentam maior resistência ao impacto e maior tenacidade relativamente aos polímeros termoendurecíveis. Os compósitos de matriz termoplástica apresentam maior dificuldade de impregnação das fibras, podem ser processados por injeção, extrusão, enrolamento filamentar ou termoformação (prensagem a quente) e são recicláveis. Os compósitos termoplásticos podem ser divididos em compósitos de fibras curtas (comprimento inferior a 6,4 mm), compósitos de fibras longas e de fibras contínuas que apresentam propriedades mecânicas superiores. Para aplicações não estruturais ou

semiestruturais, os polímeros que podemos encontrar mais frequentemente como matriz são polipropilenos, poliamidas e policarbonatos. Nos compósitos avançados de alta resistência usam-se sobretudo o PEEK (poli-éter-éter-cetona), poliimidas e o PPS (polisulfureto de fenileno) (Moura *et al*, 2011). As principais características podem ser observadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Principais características de algumas matrizes termoplásticas que podem ser usadas estruturalmente (Moura *et al*, 2011).

Matriz termoplástica	$T_{máx}$ indicada de utilização	Características
PEEK	250 °C	<p>Maior tenacidade (em relação às resinas de epóxico); baixa absorção de água.</p> <p>Processamento difícil; custo elevado.</p>
Poliimidas termoplásticas	260 °C	<p>Boa resistência e rigidez a altas temperaturas; elevada resistência mecânica; estabilidade dimensional; boas propriedades elétricas; resistente a agentes químicos; resistência à fluência; podem ser reprocessadas.</p>
PPS	225 °C	Elevada resistência mecânica e excelente resistência química.

Termoendurecível

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por moléculas que formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Os polímeros termoendurecíveis, não podem ser reprocessados, exceto por processos químicos, uma vez que sendo aquecidos adquirem uma forma permanente. As resinas termoendurecíveis, são fornecidas por norma sob a forma de um conjunto de componentes: resina, acelerador, catalisador ou endurecedor. Quando estes componentes são misturados na proporção adequada, dá-se a polimerização e a formação de uma estrutura tridimensional, este processo é denominado “cura”. Algumas resinas podem necessitar calor e/ou pressão para realizar ou acelerar o processo de cura. As propriedades mecânicas podem ser melhoradas com um tratamento pós-cura a elevada temperatura. Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço, visto que, antes da cura, apresentam viscosidades bastante inferiores às resinas termoplásticas. As resinas termoendurecíveis mais utilizadas no fabrico de compósitos para aplicações não-estruturais e semiestruturais são os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas. Em compósitos avançados de alta resistência, os epóxidos, as bismaleimidas e as poliimidas são as referências mais comuns (Moura *et al*, 2011). As principais características das matrizes termoendurecíveis podem ser vistas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Principais características das matrizes termoendurecíveis de alta resistência e mais comuns (Moura *et al*, 2011).

Matriz termoendurecível	Caraterísticas
Resinas de Epóxico	<p>Custo é consideravelmente superior ao das resinas de poliéster e o dobro do das resinas de vinilester.</p> <p>Elevada resistência mecânica; resistência à abrasão; resistência química; boa adesão às fibras; cura sem libertação de voláteis; grande estabilidade dimensional; baixa absorção de água. Temperaturas de funcionamento entre os 100 e os 220 °C.</p>
Bismaleimidas	<p>Baixo peso molecular; elevada resistência térmica; boa processabilidade; viscosidade elevada; excelente resistência térmica; bom comportamento ao desgaste; baixa flamabilidade; baixa emissão de fumos.</p> <p>São caras; são utilizadas em aplicações exigentes, na aeronáutica e na indústria espacial. São suscetíveis a ataques de álcalis (bases).</p>
Poliimidas termoendurecíveis	<p>Estabilidade dimensional a temperaturas elevadas; elevada resistência mecânica; boa resistência ao impacto; resistência à oxidação; boa capacidade de adesão; baixo coeficiente de atrito.</p> <p>Elevado custo; difícil transformação; elevada absorção de água.</p> <p>Suporta temperaturas da ordem dos 260 °C, conseguindo atingir picos de temperatura de 460 °C, por pequenos períodos de tempo.</p>
Poliésteres insaturados	<p>Baixo custo; facilidade de processamento; boas propriedades mecânicas, elétricas e químicas; a cura é instantânea após a adição de catalisadores.</p> <p>É das resinas mais utilizadas no fabrico de materiais compósitos.</p>

3.3 Processamento de Materiais Compósitos

São inúmeros os processos de fabrico associados a materiais compósitos, mas podem-se destacar: 1) Moldação por contato; 2) Moldação por vácuo; 3) Moldação por compressão; 4) Moldação por autoclave; 5) Enrolamento filamentar; 6) Pultrusão; 7) Moldação por injeção; 8) Moldação por injeção a baixa pressão e por transferência; 9) Moldação por centrifugação; 10) Moldação em contínuo; 11) Maquinagem.

Neste subcapítulo, dos processos acima referidos, apenas será feita referência a alguns processos que são utilizados na indústria automóvel. Os diferentes processos podem ser, genericamente, divididos em dois tipos:

Processos em molde aberto – Apenas uma das superfícies tem bom acabamento. No entanto, conseguem-se obter peças de grandes dimensões e de geometrias complexas. A emissão de produtos voláteis nocivos à saúde é um dos grandes problemas deste tipo de processos.

Processos em molde fechado – Apresentam excelente acabamento nas duas superfícies e ótima reprodutibilidade. Emitem menos produtos voláteis nocivos à saúde, tal como o monómero de estireno, presente na maior parte dos processos que envolvem resinas de poliéster.

3.3.1 Moldação por contato

É o método mais utilizado devido a exigir menor investimento, principalmente em compósitos com fibra de vidro. O processo pode ou não ter alguma automatização, assim distingue-se entre moldação manual e moldação por projeção (Moura *et al*, 2011).

MOLDAÇÃO MANUAL

É apenas utilizada para baixas cadências, da ordem dos 50 a 200 kg/homem/dia. Neste processo manual, o operador impregna sucessivas camadas de reforço, com resina misturada com acelerador (Gay & Hoa, 2007). Sobre a face do molde aberto, fabricado a partir de um modelo que pode ser de madeira, poliuretano, alumínio, entre outros materiais (Alto, 2009), a primeira coisa a ser aplicada é uma camada de resina de poliéster insaturado, designada por “gel-coat”, de forma a garantir um bom acabamento superficial. Para facilitar a desmoldagem é aplicado sobre o molde um agente desmoldante. Em cada camada de reforço é colocada resina catalisada (dependendo da quantidade de acelerador a cura pode levar alguns minutos a algumas horas (Gay & Hoa, 2007)) de forma a impregnar as fibras, é usado um rolo nas superfícies mais lisas e um pincel nas superfícies mais sinuosas para compactar, reduzindo assim a hipótese de existirem bolhas de ar, que seriam prováveis pontos de rotura do compósito. Apesar desses cuidados a percentagem mássica de fibra de vidro neste processo é inferior a 30% do peso de cada peça (Alto, 2009). Devido à libertação de voláteis é essencial que este processo seja realizado em locais bem ventilados, sobretudo devido ao estireno, referido anteriormente, presente nas resinas de poliéster insaturado. A simplicidade do processo, reduzido investimento inicial e as poucas restrições à geometria das peças ainda tornam este processo apetecível. No entanto, é um processo que requer uma mão-de-obra muito grande o que está intrinsecamente associado à qualidade do fator humano envolvido, e a qualidade do produto será função do cuidado do operário, tem uma baixa produtividade, bom acabamento superficial somente numa face e um teor de fibra heterogéneo. É um processo que pode ser relevante para fazer face a

algumas reparações (Moura *et al*, 2011). Na Figura 3.6, é possível observar o processo na forma esquemática.

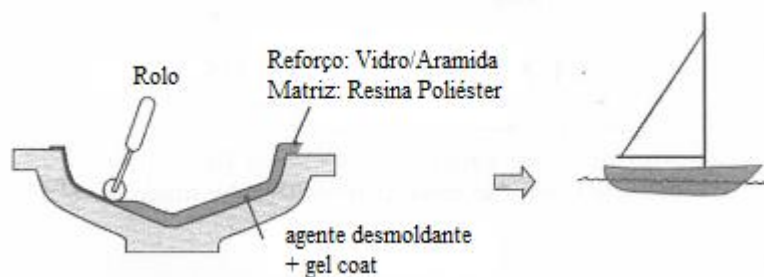


Figura 3.6 - Esquema da obtenção de compósitos por moldação manual, adaptado de Gay & Hoa (2007).

MOLDAÇÃO POR PROJEÇÃO

O processo é semelhante ao descrito anteriormente como sendo por moldação manual, mas mais automatizado (Agarwal & Broutman, 1980). O processo consiste na projeção simultânea de resina e fibra, sobre um molde, recorrendo a uma pistola de projeção. A resina empregue tem uma viscosidade inferior à utilizada na moldação manual, de forma a facilitar a impregnação, e a fibra, sob a forma de *roving*, é levada até à cabeça da pistola de projeção, onde é cortada no comprimento pretendido e expelida sobre o jato de resina, Figura 3.7. Um bom operador pode depositar uma mistura de fibra e resina na ordem dos 3 a 6 kg por minuto. No entanto, este processo está associado a pequenas séries. Geralmente a projeção é realizada por um operário, do qual vai depender fortemente a qualidade do produto final (Phillips, 1989). As características das peças obtidas por este processo têm tendência a ser piores do que por moldação manual, já que, normalmente, apenas se conseguem 15% de fibras incorporadas face aos cerca de 25% que se conseguem manualmente. Devido à emissão de estireno o processo deve ser realizado em locais arejados (Moura *et al*, 2011).

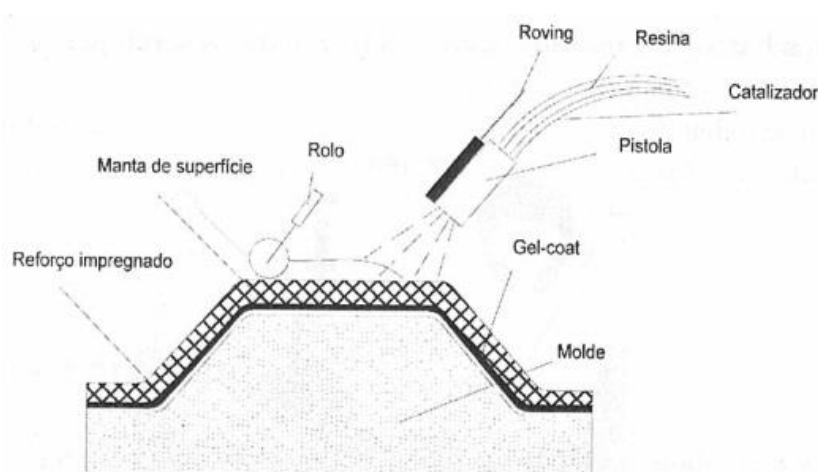


Figura 3.7 - Esquema de obtenção de compósito por moldação por projeção (Moura *et al*, 2011).

3.3.2 Moldação por compressão a quente

A compressão a quente consiste na compressão de pré-impregnados de fibras com resina. As resinas aplicadas à fibra de vidro são geralmente poliésteres insaturados às quais se junta um catalisador bastante ativo com a finalidade de acelerar o processo reativo, condição que está intrinsecamente ligada à indústria automóvel, já que as cadências de produção são pilares fundamentais desta indústria, onde este método é utilizado para produção de painéis, pisos, coberturas de radiadores, suportes para depósitos, entre outros componentes. Os moldes são pré-aquecidos a temperaturas entre 80 e 170 °C e as pressões envolvidas situam-se entre os 0,5 e os 15 MPa, o que exige a utilização de moldes metálicos. A velocidade de produção de cada peça depende da complexidade, do peso da peça moldada e da temperatura, normalmente entre 30 segundos e 4 minutos. Na compressão a quente conseguem-se maiores quantidades de produção do que na compressão a frio (até 200 peças por dia (Gay & Hoa, 2007)), e com maior precisão dimensional e sem tantas restrições de design. Conseguem-se maiores quantidades de fibras o que permite obter propriedades mecânicas superiores.

O composto de moldação, do tipo SMC (*sheet molding compound*), coloca-se no interior de um molde metálico que é previamente aquecido até aos 140 °C. Sendo comprimido, o composto flui dentro do molde preenchendo a cavidade de moldação. Dependendo da espessura, a peça considera-se pronta no final de um processo de cura de cerca de 1 a 4 minutos (Moura *et al*, 2011). Na Figura 3.8 é possível ver um esquema de moldação por compressão.

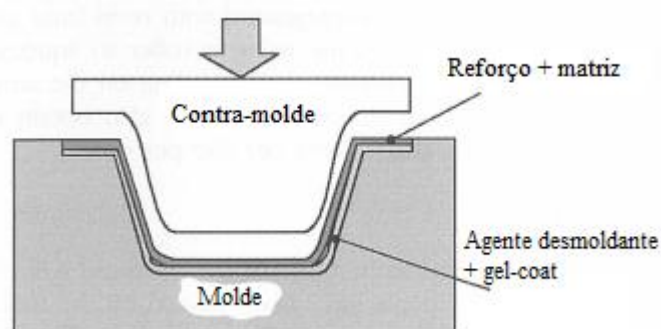


Figura 3.8 - Esquema da moldação por compressão, adaptado de Gay & Hoa (2007).

3.3.3 Moldação em Autoclave

O autoclave é praticamente o método universal quando se trabalha com peças de grandes dimensões, e onde se pretende alta qualidade de moldação. O autoclave é um reservatório de pressão cilíndrico que consegue gerar pressões elevadas. Está equipado com meios que permitem a produção de vácuo, através de membranas hermeticamente fechadas, de modo que os componentes voláteis, tais como solventes ou vapor de água possam ser removidos. O aquecimento é gerado e regulado através de resistências elétricas que aquecem a atmosfera onde se situa o molde (Phillips, 1989).

A moldação em autoclave tem por objetivo consolidar um semi-produto pré-impregnado, através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Primeiramente, baixa-se a viscosidade da resina para facilitar a eliminação de voláteis e do fluxo de resina de

modo a garantir teores de fibra elevados e homogêneos. Em seguida, realiza-se a cura e consolidação do componente em que a pressão é o fator preponderante.

Nos laminados, começa-se por cortar e empilhar sucessivas camadas, na sequência e orientação pretendida. Posteriormente, é colocado num saco de vácuo e submetido a um ciclo de pressão e temperatura. O laminado é colocado entre duas películas de Teflon® permeáveis de forma a facilitar a saída da resina sobrando e a permitir a desmoldagem. Por último é colocado um tecido homogeneizador com a finalidade de uniformizar o vácuo a todo o composto. Este conjunto é tapado por uma película de Nylon®, designada por saco de vácuo, que permite a estanquicidade, com auxílio do silicone de vedação. Este conjunto é colocado no autoclave, Figura 3.9. O tempo total do ciclo de cura é de algumas horas (Phillips, 1989).

A moldação em autoclave permite peças com geometria diversa, com excelentes propriedades mecânicas, devido a mais de 60% do volume das peças serem constituídos pelo reforço, no entanto as dimensões estão limitadas ao tamanho do autoclave. É um método adequado ao fabrico de pequenas séries de componentes sujeitos aos mais exigentes requisitos de desempenho mecânico e qualidade. No entanto tem um custo inicial elevado e o processo é demasiado lento (Moura *et al*, 2011). Exemplo da produção em autoclave é o chassi do Renault R24, já mostrado neste trabalho no capítulo 2.2, Figura 2.11.

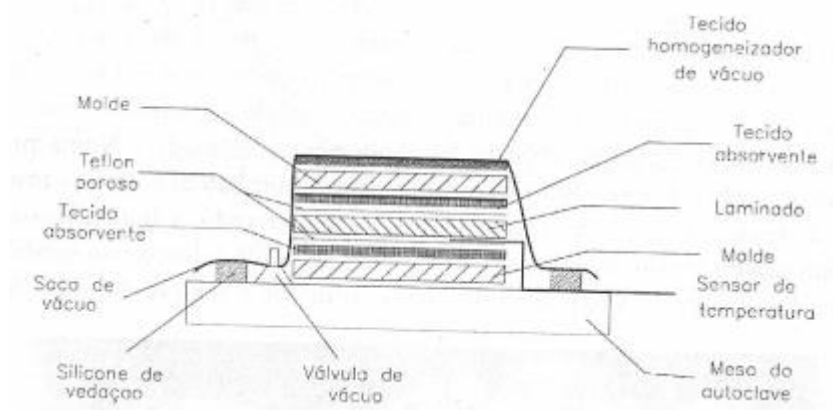


Figura 3.9 - Esquema de formação de um laminado através do autoclave (Moura *et al*, 2011).

3.3.4 Moldação por injeção de resina

Na moldação por injeção de resina, onde o método mais assinalável é o RTM – Resin Transfer Moulding (Moldação por Transferência de Resina), ambas as partes do molde são feitas de materiais rígidos e impermeáveis, enquanto a resina catalisada é injetada a pressão assinalável. A resina de epóxido é aquecida o suficiente para ter menor viscosidade, e pode ser “bombeada” através do laminado. As bolhas de ar são expelidas do reforço e o fluxo de resina é continuado até que a resina corra limpa e sem bolhas. Nesta altura, o fluxo de resina é cortado, a temperatura é aumentada, a pressão mantida, e começa a cura. Os moldes usados pela Dowty-Rotol Ltd para a sua nova família de pás de hélice são feitos de resina epóxido misturado com pó de alumínio para promover a condução de calor. O polímero para a pá é um híbrido de vidro e carbono orientados para atingir os requisitos de torção, flexão e tensão.

A moldação por injeção de resina é um processo valioso para fazer componentes de tamanho médio, Figura 3.10, onde se exige uma grande quantidade de fração de volume de reforço, e dimensões rigorosas (Phillips, 1989).

Este processo tem aplicação na indústria automóvel e o investimento é relativamente pequeno. Conseguem-se fazer até 30 peças por dia (Gay & Hoa, 2007).

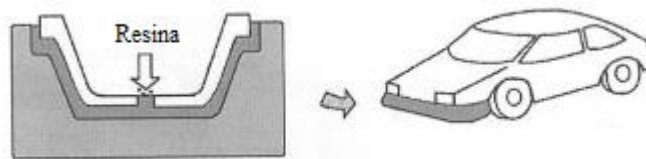


Figura 3.10 - Esquema da moldação por injeção de resina, aplicada à indústria automóvel, adaptado de Gay & Hoa (2007).

3.3.5 Pultrusão

Com este processo é possível obter perfis contínuos. O teor de fibra é importante para se conseguirem propriedades mecânicas elevadas, este deve rondar os 60 a 65% do volume (Agarwal & Broutman, 1980). A taxa de produção varia entre 0,5 a 3 m/min, dependendo da natureza do perfil (Gay & Hoa, 2007).

Na pultrusão, Figura 3.11, o reforço é puxado continuamente através de uma guia, onde as fibras são colocadas na posição correta relativamente à secção transversal do perfil que está a ser criado. As fibras são, em seguida, conduzidas através de um equipamento de processamento, onde são impregnadas com resina. A mistura de fibras e matriz é puxada através de um equipamento de aquecimento onde os perfis são curados na sua geometria final. Com o perfil já curado, este é puxado para a frente onde tem uma serra que permite cortar o perfil no comprimento pretendido (Fiberline, s.d.).

Quando o reforço entra no equipamento de processamento a resina é injetada. A injeção de resina é vantajosa no controlo do reforço, acelera a passagem de um perfil para outro e facilita as alterações da matriz durante o processo. O grau de impregnação das fibras é bom, e é determinante para as propriedades do perfil. Atualmente, e contrariamente aos métodos tradicionais, o processo de injeção, na pultrusão, é um processo totalmente fechado que reduz imenso a evaporação de solventes, refere a Fiberline (s.d.). Após a impregnação da matriz sobre o reforço todo o produto avança para a etapa seguinte onde se dá o aquecimento para acelerar a cura. O perfil deve estar totalmente curado quando sai do equipamento de processamento, para estar pronto a ser cortado. O corte é feito por uma serra, que se desloca a velocidade idêntica à que o perfil é puxado para fora do equipamento. Assim é garantido um processo contínuo (Fiberline, s.d.).

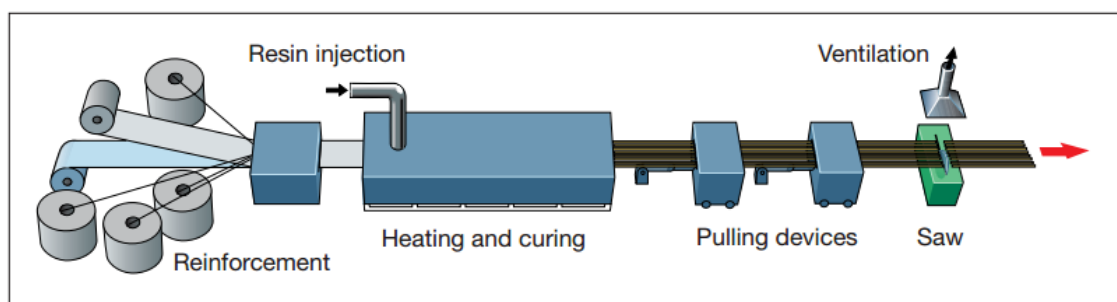


Figura 3.11 - Obtenção de perfis por pultrusão; in “<https://fiberline.com/pultrusion>, consultado em 2016-07-15, 16:30”.

3.4 Maquinagem de Materiais Compósitos

O estudo da maquinagem em materiais compósitos é essencial, já que esta provoca comportamentos diferentes dos que são observados nos materiais metálicos. A furação e corte dos materiais compósitos são duas das operações mais utilizadas. A maquinagem de materiais compósitos: i) é uma operação que fragiliza bastante o compósito, devido à heterogeneidade e anisotropia dos materiais; ii) gera a rotura de algumas fibras o que debilita o desempenho do componente; iii) gera a rotura da matriz o que expõe as fibras aos elementos ambientais ou químicos; iv) torna necessária a utilização de um fluido de arrefecimento, uma vez que nos compósitos parte do calor gerado é absorvido pela peça e aparas, a outra parte pela ferramenta; v) encurta o tempo de vida das ferramentas de maquinagem, já que os compósitos são, normalmente, abrasivos; as ferramentas são usualmente diamantadas ou revestidas para reduzir o seu desgaste; vi) desfavorece superfícies de corte bem acabadas, nomeadamente em fibra de aramida, uma vez que é muito tenaz e absorve muita energia no decorrer da operação; vii) provoca delaminagens junto às superfícies de corte, que terá maior ou menor expressão consoante a sequência de empilhamento das camadas e a sua orientação (Moura *et al*, 2011).

FURAÇÃO

A furação é uma operação importante e permite, entre outras coisas, uma ligação simples e eficaz entre duas peças, através da aplicação de um parafuso, pino ou cavilha, por exemplo. Em materiais compósitos esta operação é, geralmente, realizada por brocas revestidas a carboneto de tungsténio, nitreto de titânio ou diamantadas. A furação pode enfraquecer as peças, por acarretar problemas de ordem distinta, tais como descolamento entre a fibra e a matriz, danos devido ao sobreaquecimento, fissuras interlaminares, delaminagens, tanto à entrada como à saída da broca, Figura 3.13. À entrada, a broca propicia o arrancamento das primeiras camadas, a partir do momento em que a extremidade da broca inicia o furo. À saída, a broca e a sua força de avanço promovem delaminagens entre as camadas inferiores, já que, embora a broca tenha um movimento de rotação, o seu centro permanece quase imóvel (Moura *et al*, 2011). Assim, a zona central da broca exerce um esforço que mais se assemelha a uma extrusão do que a uma furação com arranque de aparas. Num estudo realizado por Durão *et al* (2011), é afirmado que o início da delaminação é função da força axial. Como tal, e tendo em conta a força axial máxima como termo de comparação, concluíram que:

- Os valores da força máxima, e consequentemente de delaminação, durante a furação dependem do material compósito em si, da geometria da broca (no caso do estudo, broca do tipo “Brad” e broca helicoidal) e do avanço escolhido;
- O aumento do avanço faz aumentar quer o valor da força máxima durante a furação, quer a extensão da delaminação;
- Para qualquer dos materiais as forças de corte e a extensão do dano são mais elevadas nos furos executados com broca helicoidal;
- Os valores de resistência mecânica nos dois ensaios realizados mostram uma maior influência do material do que das condições de corte;

Posto isto, interessa mostrar os tipos de brocas que foram referidas no estudo referenciado acima, Figura 3.12. Outros estudos revelaram ainda que as brocas pontiagudas originam uma penetração mais gradual, diminuindo assim a extensão das delaminagens. E ainda foi comprovado que a força de avanço pode ser substancialmente reduzida se for realizado um pré-furo de menor diâmetro. Pode-se ainda afirmar que o senso comum diz que o apoio do

componente a furar sobre suportes de plástico ou de madeira e a diminuição da velocidade de avanço à saída da broca contribuem para a minimização das delaminagens. Os laminados com fibras diferentemente orientadas tendem a apresentar melhores superfícies após maquinagem do que os laminados unidirecionais (Moura *et al*, 2011).



Figura 3.12 - Brocas: a) Helicoidal; b) tipo "Brad" adaptado de Durão *et al* (2011).

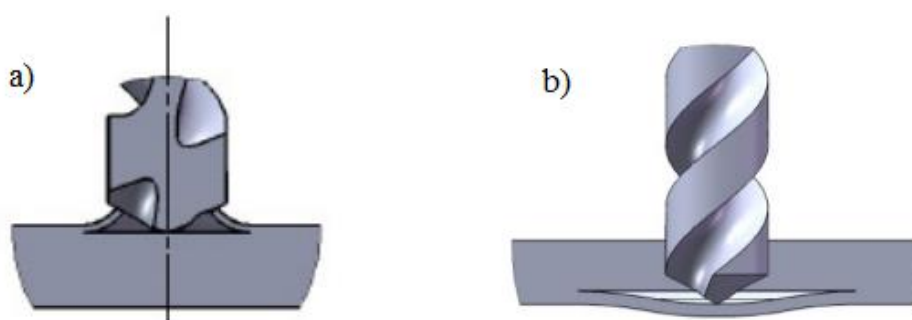


Figura 3.13 - Delaminação por furação: a) Delaminação à entrada da broca; b) Delaminação à saída da broca; adaptado de Durão *et al* (2011).

CORTE

Os materiais compósitos podem ser cortados por diferentes métodos: corte com jato de água, corte com laser ou corte por serra.

A utilização de serras de disco ou fita para o corte de materiais compósitos, geralmente pressupõe que estas sejam diamantadas para melhorar a resistência ao desgaste. Pretendendo-se um corte com melhor qualidade, a velocidade de corte deve ser a maior possível, de acordo com a matriz utilizada, reduzindo as forças de avanço, o que diminui a quantidade de defeitos criados pelo corte.

O corte por jato de água, recorre a velocidades elevadíssimas (800 m/s) através de uma abertura com diâmetro muito reduzido (0,25 mm), a pressão da água atinge valores superiores a 400 MPa. Os parâmetros fundamentais para este tipo de corte são: velocidade de corte, pressão da água, espessura do compósito e o diâmetro do orifício de saída. Geralmente utilizam-se partículas abrasivas misturadas com a água para aumentar a velocidade de corte e cortar laminados mais espessos. Quanto menor o orifício de saída, maior a pressão ou menor a velocidade de corte, melhor é a qualidade do corte. O diâmetro do orifício de saída da água quando é reduzido em demasia, apesar de conseguir melhor acabamento de corte, pode não ser o suficiente para cortar laminados mais espessos.

No corte por laser utiliza-se um feixe concentrado de ondas laser com idêntica frequência, focado na peça a cortar. O corte dá-se por fusão, vaporização e degradação química. Geralmente, a resina é danificada na zona de corte devido ao aquecimento localizado que é

provocado, já que são necessárias altas temperaturas para cortar as fibras. A exaustão dos gases emitidos durante este processo de corte é essencial (Moura *et al*, 2011).

Uma das soluções para minimizar a recorrente quebra de fibras durante a maquinagem tem sido a consideração do ângulo de orientação das fibras. Um estudo de Calzada *et al* (2011), realizado com fibras de carbono, prevê qual o ângulo adequado para se cortar um compósito. Sendo θ o ângulo de orientação das fibras, Figura 3.14.

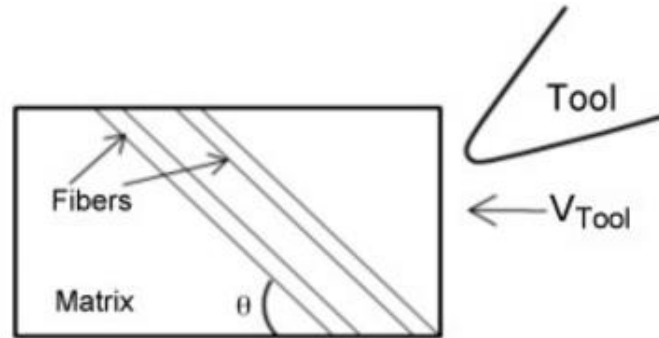


Figura 3.14 - Definição de ângulo de orientação das fibras (Calzada *et al*, 2011).

Na Figura 3.16 é possível ver os resultados obtidos através do corte de fibras de carbono com várias inclinações. Os resultados obtidos no estudo são bastante elucidativos da importância do ângulo de corte e podem ser observados na Figura 3.15.

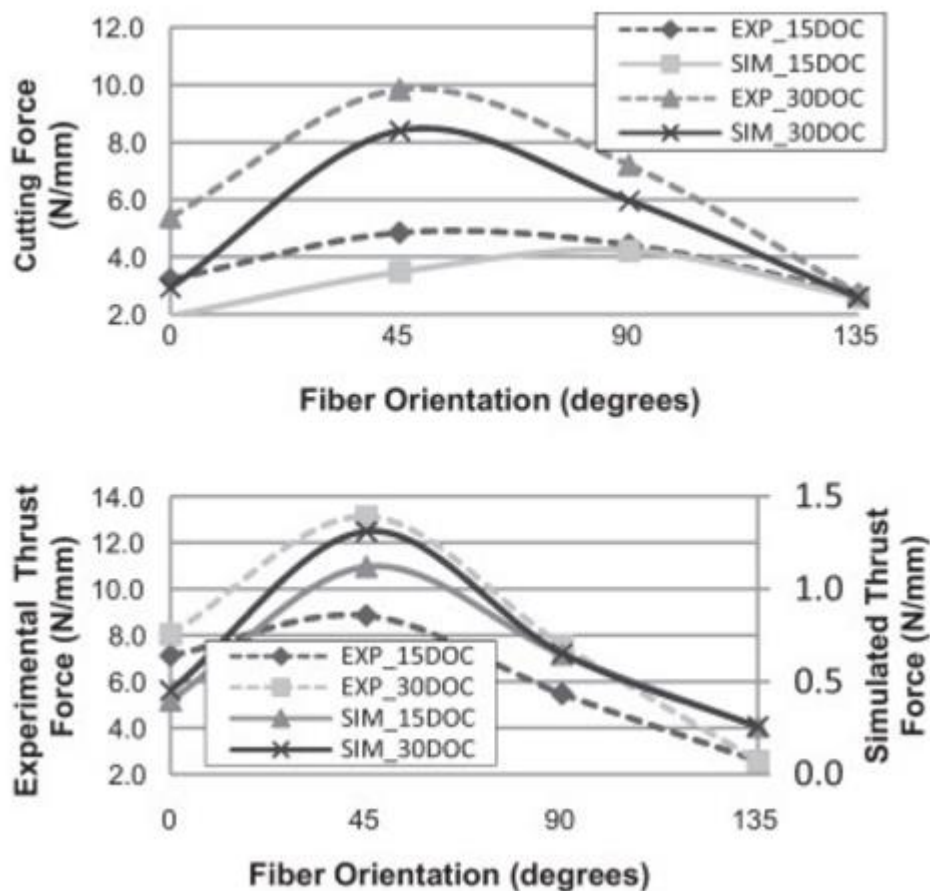


Figura 3.15 - Forças envolvidas no corte em função da orientação das fibras (Calzada *et al*, 2011).

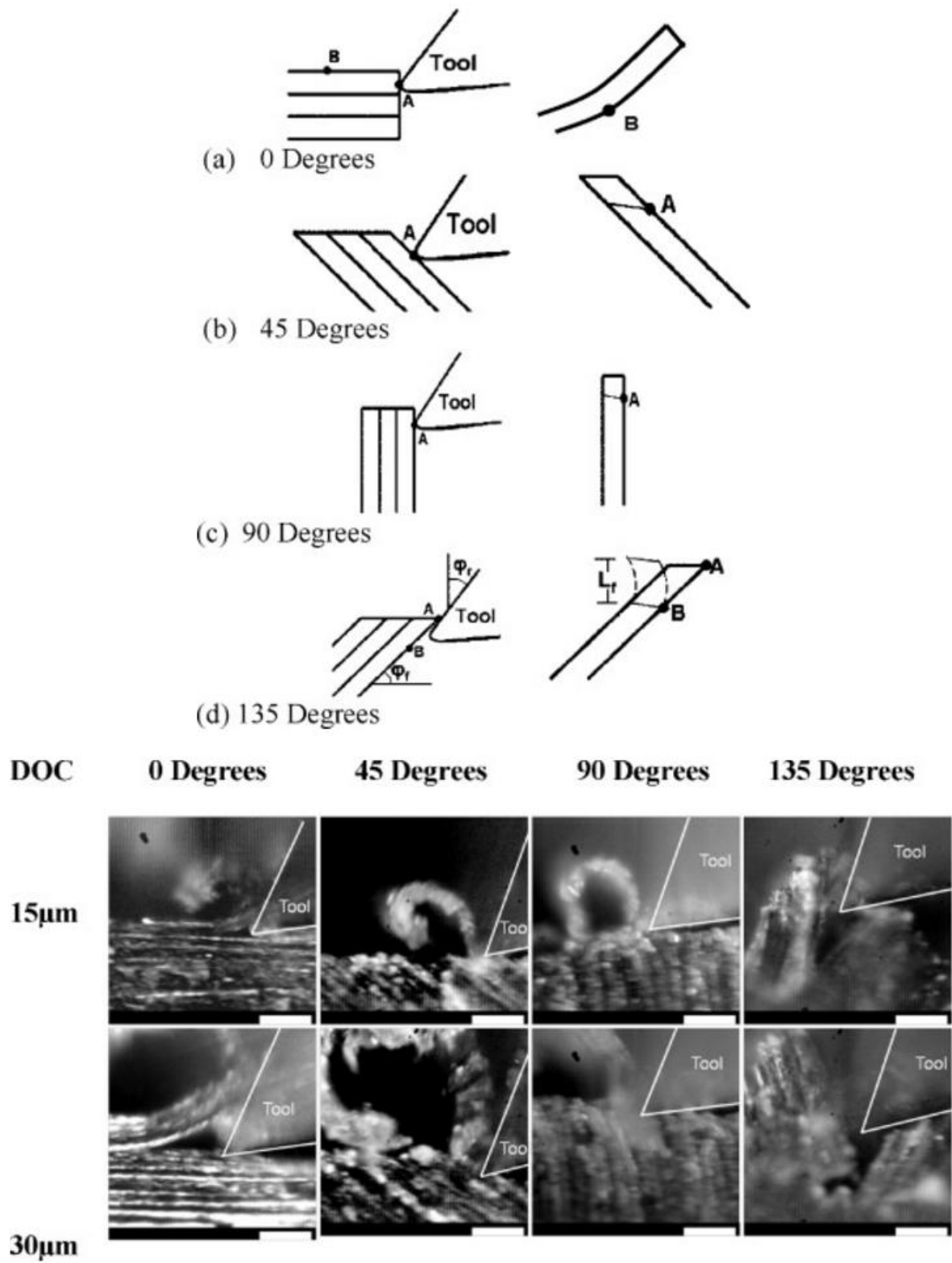


Figura 3.16 - Representação esquemática e microscópica do corte de compósitos em várias inclinações diferentes (Calzada *et al*, 2011).

3.5 Análise das camadas dos laminados

Os compósitos de fibras contínuas apresentam rigidez e resistências altas, sendo por essa razão preferíveis para aplicações estruturais de grande exigência. Estes materiais possuem, normalmente, uma estrutura laminada, isto é, são formados por várias camadas, e cada camada possui uma orientação definida. A camada é, então, considerada um só elemento, unidirecional, cujo comportamento mecânico é essencial ser conhecido para se proceder ao estudo do laminado como um só.

As propriedades térmicas e mecânicas das fibras e da matriz são responsáveis por definir as tensões internas da camada, bem como caracterizar as suas propriedades mecânicas efetivas. Torna-se, então, crucial conhecer os modelos capazes de antecipar as propriedades da camada em função da sua provável composição.

Apesar de se recorrer a um modelo homogeneizado, o estudo dos laminados não é, por isso, tão simples como é o da análise do aço ou do alumínio, que no regime elástico apresentam propriedades isotrópicas. No caso dos compósitos devido às diferenças de propriedades entre reforço e matriz, bem como a orientação das fibras, cada camada é anisotrópica. Sabe-se que a rigidez na direção das fibras é uma ou duas ordens de grandeza superior à rigidez na direção perpendicular (Moura *et al*, 2011).

CONSTANTES DE ENGENHARIA DA CAMADA

Existem diversos modelos para prever as Constantes de Engenharia independentes dos compósitos unidirecionais de fibras contínuas. Os modelos são de complexidade diversa, mas baseiam-se quase sempre no mesmo conjunto de pressupostos (Moura *et al*, 2011):

- fibra e matriz são os únicos constituintes, omitindo vazios e inclusões;
- comportamento linear elástico para fibra e matriz, que é considerada isotrópica;
- perfeita adesão interfacial fibra/matriz.

Tsai (2008) apresenta uma abordagem gráfica intuitiva, Figura 3.17, onde é possível observar previsões para diversas constantes de engenharia em função do volume de fibras, para o caso de compósitos em fibras de vidro com resinas de epóxico, que será utilizado nos modelos subsequentes. Note-se ainda a dificuldade em estimar certas propriedades, que para valores mais elevados de volume de fibras (em percentagem), divergem bastante de modelo para modelo. Relativamente a esta abordagem gráfica interessa-nos somente ter uma primeira noção da ordem de grandeza das propriedades mecânicas da fibra de vidro e, portanto, não nos vamos nesta fase preocupar em aprofundar os métodos e aproximações utilizados para se conseguirem obter estes valores.

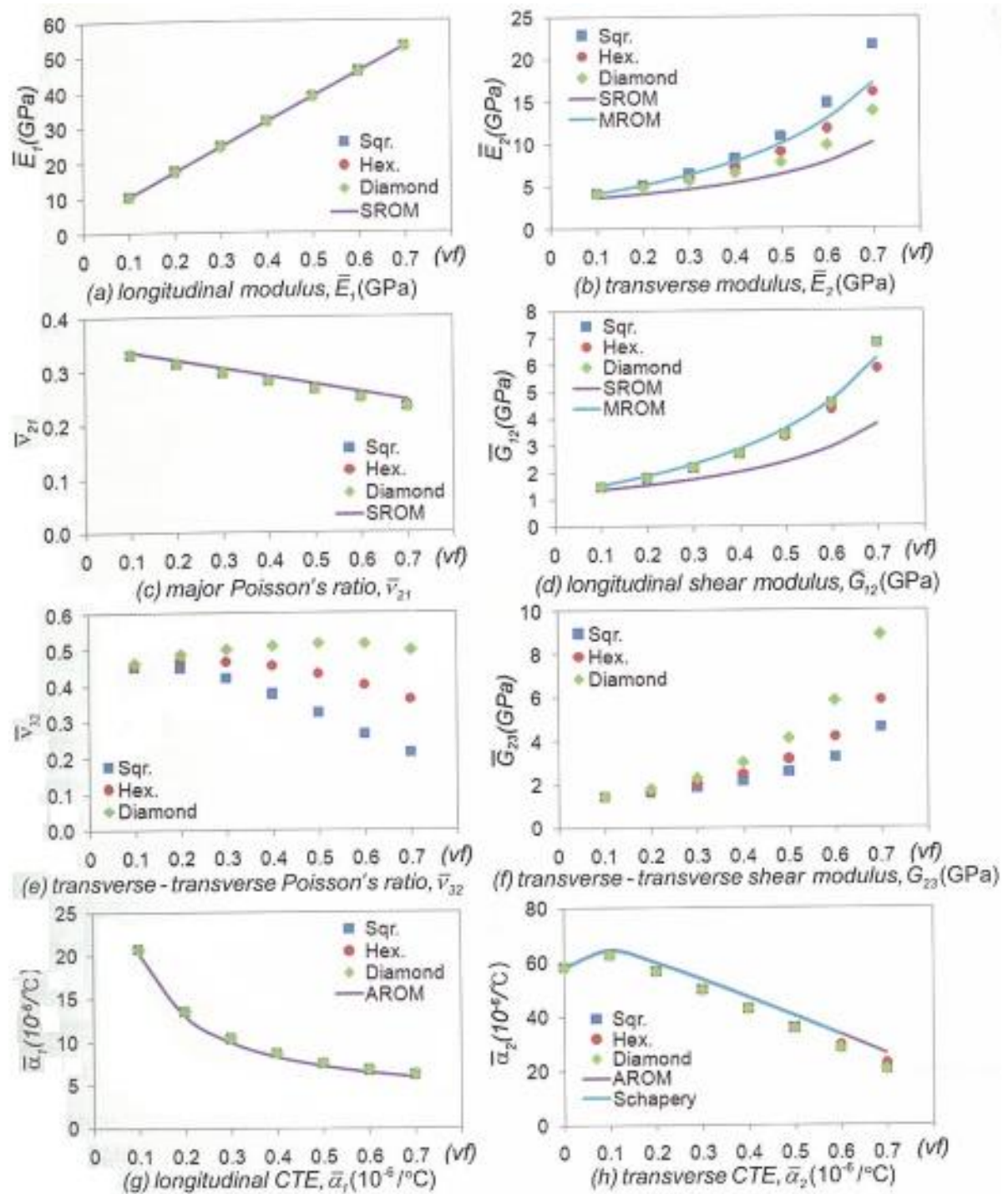


Figura 3.17 - Previsão das propriedades do compósito de acordo com a fração de volume de fibra (fibra de vidro/epóxico) (Tsai, 2008).

3.6 Fadiga em Materiais Compósitos

As solicitações de fadiga são cargas cíclicas aplicadas abaixo do limite elástico dos materiais, o que pode originar e proliferar defeitos capazes de provocar a rotura. Nos materiais homogêneos e isotrópicos a rotura por fadiga surge devido ao aparecimento e propagação de uma fenda, enquanto nos compósitos ocorre uma acumulação de dano de origem distinta: fissuração transversal e longitudinal, descoesão fibra-matriz, delaminação e rotura de fibras.

Os compósitos unidirecionais têm boa resistência à fadiga na direção das fibras.

- 1) Para solicitações mais exigentes, o dano principia pela rotura de algumas fibras devido à inconstância da resistência da fibra ao longo do seu comportamento. Tal facto cria regiões de concentração de tensões e propaga o processo de rotura para as fibras mais próximas. Este processo acelera exponencialmente debilitando o compósito nessa zona, e após mais alguns ciclos é de se prever uma rotura catastrófica.
- 2) Para solicitações de fadiga de menores valores, as tensões na fibra são inferiores. No entanto, a deformação da matriz pode exceder o seu limite de fadiga. Desta forma, o dano inicia-se por falha na matriz o que instiga à descoesão fibra/matriz.

O processo referido em 2) ocorre de uma forma gradual e, ao contrário do caso 1), pode arrastar-se durante 10^6 ciclos. Para valores intermédios de cargas cíclicas o mecanismo de dano consiste numa conjugação dos dois processos apresentados. Portanto, a rotura de algumas fibras, 1), incita na vizinhança uma sobrecarga na matriz originando a descoesão fibra/matriz, 2), e a rotura da matriz.

Os compósitos unidirecionais têm uma grande rigidez e resistência mecânica na direção das fibras, e nas outras direções não, já um compósito multidirecional pode apresentar um comportamento equilibrado em diferentes direções, dependendo da orientação das suas camadas. É, então, esperado um mecanismo de dano distinto, em que se apresentam três fases, que podem ser observadas na Figura 3.18:

- 1) A rigidez baixa consideravelmente, o que é explicado pela iniciação da rotura da matriz nas camadas com orientação diferente da solicitação. O dano principia nas camadas cuja diferença de orientação das fibras é máxima relativamente à solicitação (quando a solicitação se aproxima da perpendicular relativamente à orientação das fibras). A descoesão dá-se pela diferença de rigidez entre matriz e fibra, e por fatores concentradores de tensão como é o caso de vazios, zonas ricas em resina, fatores de origem térmica e outros.
- 2) Em seguida, a fissura tende a propagar-se paralelamente às fibras até atingir toda a espessura da camada. A quantidade destas fissuras aumenta com o número de ciclos até à saturação, esta situação origina um pequeno decréscimo da rigidez.
- 3) Quando as fissuras chegam às interfaces entre diferentes camadas aparecem as delaminações, e que se propagando rapidamente originam a separação do laminado em camadas isoladas, o que leva à rotura de fibras das camadas alinhadas com a solicitação conduzindo à rotura final do laminado.

Os ciclos de tração-compressão são, normalmente, fatais para os laminados multidirecionais. Valores elevados de tração incitam à fissuração e ao início da delaminação enquanto os de compressão são causadores da proliferação instável das fissuras. Os compósitos multidirecionais apresentam menor resistência à fadiga que os unidirecionais quando a solicitação é na direção das fibras. A resistência à fadiga é tanto menor quanto maior for o ângulo entre a solicitação cíclica e a orientação das fibras.

Os compósitos de fibras curtas são muito mais suscetíveis ao aparecimento de dano, uma vez que a matriz absorve uma quantidade de carga muito superior à que é absorvida no caso de um compósito de fibras contínuas.

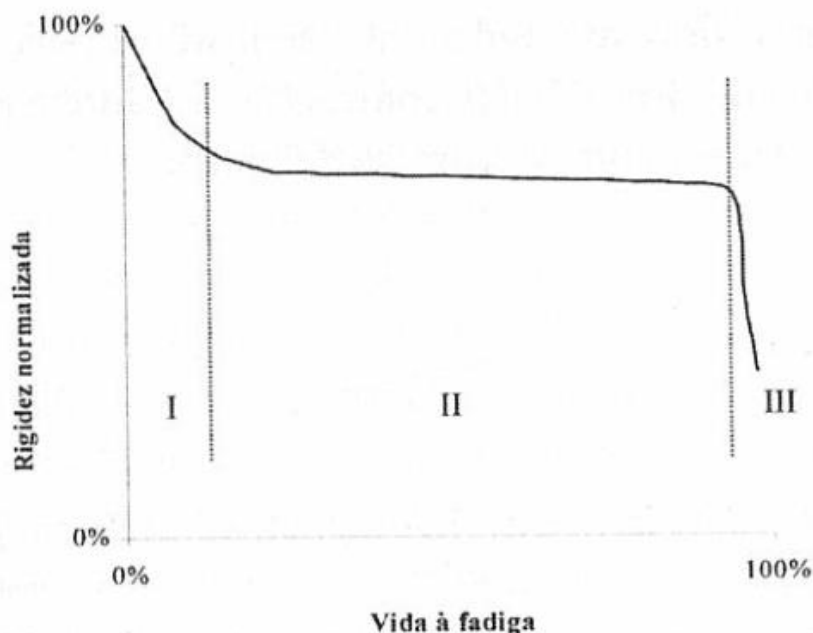


Figura 3.18 - Evolução típica em fadiga da rigidez normalizada de um compósito de carbono-epóxido multidirecional, adaptado de Moura *et al* (2011).

Os compósitos de tecido apresentam comportamento à fadiga semelhante aos laminados cruzados do tipo $[0/90]$. No entanto, a sua resistência à fadiga é ainda menor uma vez que as zonas de ondulação, onde as fibras se cruzam, são pontos onde se espera o início da rotura da matriz e delaminação (Moura *et al*, 2011).

MECANISMOS E MÉTODOS DE ROTURA

A rotura da camada é, geralmente, um processo complexo, que está ligado à plasticidade e formação e desenvolvimento de fendas localizadas, sendo a sua previsão muito difícil. No entanto, a Micromecânica permite tirar conclusões úteis acerca dos mecanismos de rotura e das propriedades pertinentes dos constituintes da camada.

Interessa referir que à imagem do que acontece com os módulos de elasticidade, as diferenças entre a rigidez longitudinal e transversal são enormes. As elevadas resistências longitudinais à tração e compressão, por si só, justificam que se procurem colocar os compósitos estruturais nessas situações de esforços, de modo a explorar o máximo desempenho do compósito. As elevadas resistências longitudinais são facilmente explicáveis pela presença de maior parte das camadas orientadas nessa direção, como tal as fibras alinhadas com a solicitação conferem a resistência ao compósito. Saliente-se ainda que, no caso de compósitos multidirecionais, interessa frisar que a importância das camadas orientadas na direção dos esforços principais se deve à necessidade de garantir a integridade estrutural do material, mas não menos importante é a presença de camadas noutras direções de forma a conseguirem suportar solicitações diferentemente orientadas.

Num compósito unidirecional, o processo de rotura é complexo, uma vez que se a tensão aumentar, vão ocorrendo roturas consecutivas em pontos mais frágeis das fibras, e as tensões serão redistribuídas pelas restantes fibras.

A previsão da resistência longitudinal à compressão apresenta relevância, uma vez que estes valores são de difícil obtenção por via experimental. Nos ensaios de tração geralmente obtém-se valores superiores aos que são obtidos nos ensaios de compressão de provetes unidirecionais. Isto deve-se a efeitos de transmissão de carga, que levam à rotura precoce na região onde os provetes são amarrados. Provou-se com métodos de ensaio atuais, em vários tipos de compósitos, que a resistência à compressão é, geralmente, superior à resistência à tração. Numerosos estudos experimentais demonstraram que o mecanismo de rotura das fibras à escala micromecânica é a microencurvatura das fibras, que por vezes origina as bandas de corte, Figura 3.19, que se observam após a rotura dos provetes (Moura *et al*, 2011).

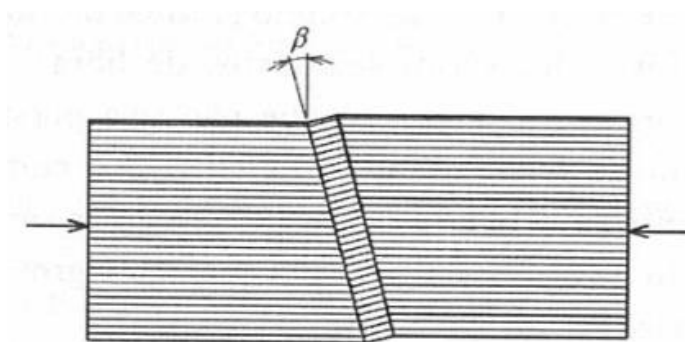


Figura 3.19 - Bandas de corte observadas em ensaios de compressão de compósitos unidirecionais (Moura *et al*, 2011).

É sempre importante frisar que por mais rigorosos que sejam os modelos estes não se podem tomar como absolutos, pelo que será sempre boa política realizar ensaios práticos de comprovação para os materiais compósitos a serem aplicados no projeto (Moura *et al*, 2011).

Existem diversos critérios de rotura, que se podem agrupar em: critérios não interativos, que não têm em conta os efeitos combinados das várias componentes do tensor das tensões; critérios interativos e critérios parcialmente interativos, que procuram um equilíbrio entre a interatividade e a capacidade de identificar modos de rotura.

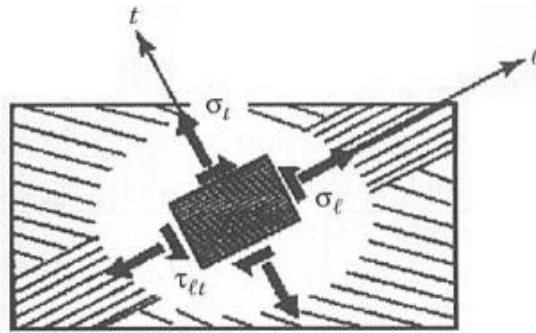
Neste tópico vou salientar dois métodos para prever a rotura de um componente:

- 1) O critério de rotura denominado *Tsai-Hill*, é um critério interativo que se exprime em função das tensões sob a forma de polinómio do segundo grau. Deriva do critério de *Hill* de cedência plástica dos metais, que foi desenvolvido a partir do critério de cedência de *Von Mises* para metais isotrópicos (Moura *et al*, 2011).

Segundo Gay & Hoa (2007), pode recorrer-se à formulação *Hill-Tsai number*, que define uma variável α como sendo determinável da forma explícita na Figura 3.20.

Se $\alpha < 1$, não ocorre rotura da camada; Se $\alpha \geq 1$, é esperada rotura na camada considerada, geralmente esta deterioração ocorre devido à rotura da matriz.

- 2) O critério de *Hashin*, é um critério parcialmente interativo, tem a capacidade de identificar modos de rotura ao nível da fibra e da matriz, e divide-se em quatro modos de falha: a falha da fibra quer à tração quer à compressão, bem como a falha da matriz devido às mesmas solicitações.



$$\alpha^2 = \left(\frac{\sigma_l}{\sigma_{\ell}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_t} \right)^2 - \frac{\sigma_l \sigma_t}{\sigma_{\ell}^2} + \left(\frac{\tau_{lt}}{\tau_{lt}} \right)^2$$

(Rupture) (Rupture) (Rupture) (Rupture)

Figura 3.20 - Critério de rotura Hill-Tsai (Gay & Hoa, 2007).

3.7 Estruturas Sanduíche

As estruturas em sanduíche ocupam uma grande parte do design com materiais compósitos. Elas aparecem em quase todas as aplicações. Na maioria dos casos são concebidas para uma aplicação específica (Gay & Hoa, 2007).

Uma estrutura sanduíche resulta da colagem de adesivos ou soldadura de duas faces finas, de elevada rigidez e resistência mecânica, num núcleo, o mais leve possível, que é usado para manter as faces afastadas o mais possível. Os adesivos costumam ter espessuras da ordem dos 0,025 mm até 0,2 mm. Desta forma, é possível combinar o baixo peso com uma elevada rigidez (Gay & Hoa, 2007; Almeida, 2013).

Existem muitas formas de combinar os diversos materiais para a obtenção de estruturas sanduíche consoante as necessidades que as aplicações exigem. Maioritariamente, as faces são formadas por aço, alumínio, madeira ou laminados de compósitos. Para o núcleo normalmente são utilizados: espumas poliméricas de baixa densidade, ninhos de abelha, balsa, cortiça entre muitos outros materiais (Almeida, 2013).

Em relação à sua resistência mecânica, o seu comportamento é semelhante aos perfis em “I”, em que os banzos são as faces da estrutura sanduíche e a alma o seu núcleo, Figura 3.21. É sabido que nessas estruturas são, essencialmente, os banzos que suportam os esforços de flexão impostos à estrutura, trabalhando tal como o verificado para um perfil em “I”, um banzo à compressão e o outro à tração. O núcleo tem por função evitar o deslizamento das faces, suportando assim os esforços de corte originados pela flexão das faces (Almeida, 2013).

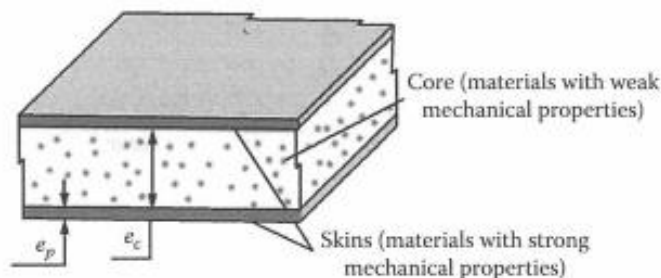


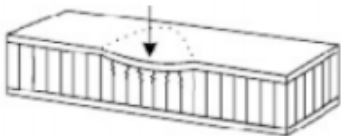



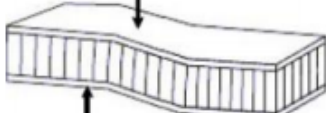

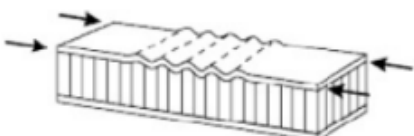
Figura 3.21 - Estrutura Sanduíche ($10 \leq e_c/e_p \leq 100$) (Gay & Hoa, 2007).

3.7.1 Modos de falha

O núcleo tem dimensões iguais às das faces e terá que ter resistência ao enrugamento e esmagamento causado pela concentração de cargas, de modo a manter a estrutura íntegra.

Interessa agora observar os principais mecanismos de falha das estruturas sanduíche e quais as razões que levam a isso, Tabela 3.8 (Almeida, 2013).

Tabela 3.8 – Principais mecanismos de falha de estruturas sanduíche e causas para o seu aparecimento (Almeida, 2013)

Modo de Falha	Causas
Esmagamento local do núcleo 	Ocorre quando a resistência à compressão do material do núcleo é demasiado baixa.
Enrugamento local 	Verifica-se quando a espessura do painel ou a resistência do núcleo ao corte são demasiado baixas.
Enrugamento geral 	Este fenómeno pode surgir em consequência de um enrugamento local, ocorrendo quando o módulo de corte do núcleo ou a resistência ao corte do adesivo é demasiado baixo.
Enrugamento das faces 	Falha à compressão do núcleo (enrugamento para dentro), ou falha nos adesivos (enrugamento para fora), pode ocorrer, dependendo da resistência relativa do núcleo à compressão em comparação com a resistência dos adesivos em tensão no plano.
Falha causada pelo esforço transverso 	Ocorre quando a resistência do núcleo ao corte ou a espessura do painel são insuficientes.
Falha das faces 	Espessura insuficiente das faces e/ou resistência das faces insuficiente podem causar falha das faces, que pode ocorrer tanto na face à tração como na face à compressão.
Instabilidade local 	Enrugamento intracelular (passível de ocorrer apenas em materiais celulares) ocorre quando as faces são muito finas em relação ao tamanho de célula. Este efeito provoca falha se se propagar para células adjacentes.

3.7.2 Propriedades

A grande variedade de materiais que podem ser utilizados nos núcleos dos painéis sanduíche será certamente alvo de grande estudo e complexidade para um projetista. No entanto, igualmente, é de sobremaneira passível que possa ser usado de forma otimizada.

As principais vantagens para utilização das estruturas sanduíche são: 1) a elevada resistência e rigidez específica; 2) bom comportamento à flexão; 3) baixo peso; 4) boas

propriedades de resistência ao impacto; 5) bom isolamento térmico e acústico. Podem ser obtidas peças de geometria complexa, devido ao seu modo de construção, o que torna possível a obtenção de peças complexas numa única peça (Almeida, 2013).

A principal desvantagem do uso dos painéis sanduíche reside no facto do comportamento destas estruturas ser ainda pouco conhecido, o que é em grande parte causado pelas infinitas combinações de materiais que podem fazer parte do painel sanduíche. Isto pode originar comportamentos inesperados como incompatibilidade de materiais, fraca resistência à fadiga e problemas com a temperatura ou humidade (Almeida, 2013).

Um sobredimensionamento pode contornar alguns destes problemas, o que poderá acarretar algum peso excessivo, mas aumentar a vida útil da estrutura. Esse peso excessivo pode não ser alarmante, embora possa facilmente ser da ordem dos 20 ou 30%, já que a utilização dos painéis sanduíche tem em vista a diminuição do peso da estrutura e, como tal, esse aumento provavelmente não é exagerado, já que será, mesmo assim, possível construir-se estruturas com pesos inferiores aos que se obtém com os materiais tradicionais.

Os painéis sanduíche não são facilmente recicláveis e relativamente a isso poderia surgir uma grande preocupação. No entanto, e sendo a aplicação em causa um chassi automóvel, o qual não é uma estrutura descartável, este não será um dos pontos fundamentais a serem pensados nesta fase inicial de conceção.

Tabela 3.9 - Vantagens e desvantagens da utilização de painéis sanduíche, adaptado de Almeida (2013).

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> Alta resistência específica; Alta rigidez específica; Baixo peso; Isolamento térmico e acústico; Capacidade de resistência à corrosão; Facilidade de construção de formas complexas; Capacidade de absorção de energia; Poucas peças estruturais necessárias; 	<ul style="list-style-type: none"> Poucas possibilidades de reciclagem e de reparação (compósitos); Falta de informação dos engenheiros e <i>designers</i>; Fraca resistência ao fogo para certos núcleos; Requer um controlo de qualidade muito importante; Problemas relacionados com incompatibilidades entre os materiais.
<ul style="list-style-type: none"> Versatilidade de escolha de materiais. 	

3.7.3 Tensões num elemento de viga

A Figura 3.22 mostra as principais tensões provenientes da aplicação de momentos de flexão a uma viga sanduíche. A viga está encastrada de um lado e a força T na outra extremidade. Isolando um elemento de viga, numa secção transversal, é visível o *esforço de corte resultante*, T , bem como o *momento resultante*, M . O *esforço de corte resultante*, T , causa *tensões de corte*, τ , e o *momento resultante*, M , causa *tensões normais*, σ .

Para estimar os valores de τ e σ , podem-se adoptar as seguintes simplificações:

- As tensões normais surgem somente nas faces, e são constantes ao longo da espessura das faces.
- As forças de corte surgem somente no núcleo e são uniformes ao longo deste.

Dessa forma obtém-se as expressões para τ e σ para uma viga de uma unidade de espessura, e faces finas como representado na Figura 3.23.

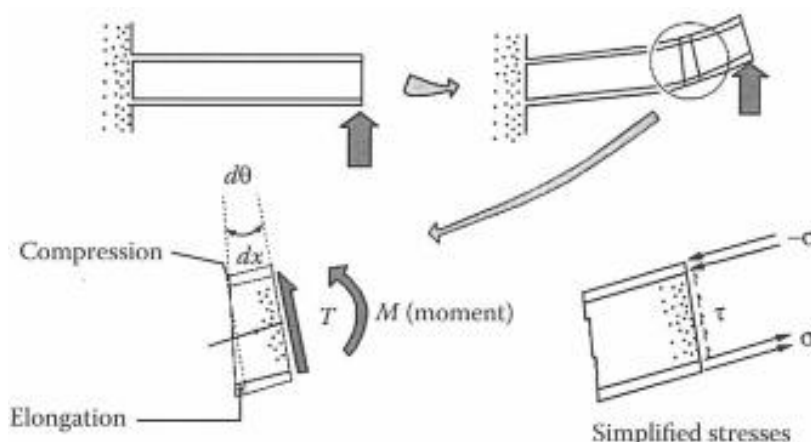


Figura 3.22 - Representação de uma estrutura sanduíche solicitada à flexão (Gay & Hoa, 2007).

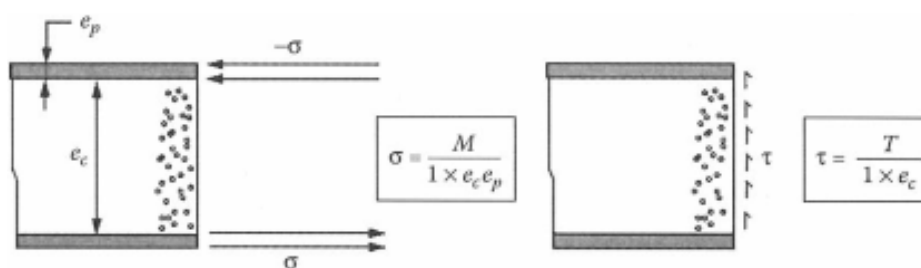


Figura 3.23 - Tensões numa estrutura sanduíche (Gay & Hoa, 2007).

3.7.4 Encurvadura de Estruturas Sanduíche

A resistência à compressão de todas as partes de um painel sanduíche é limitada pelos chamados valores críticos da carga aplicada, acima do qual a carga aplicada provoca deformações grandes e inaceitáveis. Este comportamento é designado por encurvadura da estrutura, Figura 3.24. Dependendo do tipo de carga, podemos estar perante encurvadura local ou global.

ENCURVADURA GLOBAL

Dependendo das condições fronteira, a carga crítica de encurvadura (Figura 3.24), F_{cr} , é dada por

$$F_{cr} = K \frac{\pi^2 \langle EI \rangle}{\ell^2 + \pi^2 \frac{\langle EI \rangle}{\langle GS \rangle} kK}$$

Figura 3.24 - Coeficientes de encurvadura para diferentes condições fronteira (Gay & Hoa, 2007).

sendo $\langle EI \rangle$ a rigidez à flexão e $\langle GS \rangle$ dado por

$$k/\langle GS \rangle = 1/G_c(e_c + 2e_p) \times 1$$

ENCURVADURA LOCAL DAS FACES

As faces estão sujeitas a encurvadura devido a baixa rigidez do núcleo. Dependendo do tipo de carga, podem-se obter deformações como as presentes na Figura 3.25.

A carga crítica de compressão é dada pela equação abaixo onde ν_c representa o coeficiente de Poisson do núcleo.

$$\sigma_{cr} = a \times (E_p \times E_c^2)^{1/3}$$

$$\text{com } a = 3[12(3 - \nu_c)^2(1 + \nu_c)^2]^{-1/3}$$

A carga crítica que causa problemas devido a encurvadura local das faces, e os tipos de danos estão identificados na Figura 3.26.

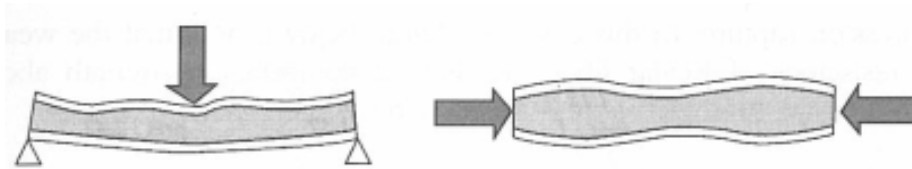


Figura 3.25 - Encurvadura local das faces (Gay & Hoa, 2007).

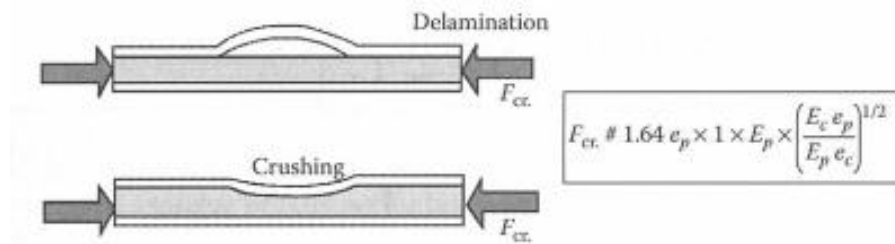


Figura 3.26 – Dano por encurvadura local (Gay & Hoa, 2007).

3.7.5 Outros tipos de dano

Esmagamento local: Este é o esmagamento do material do núcleo no sítio onde é aplicada a carga, Figura 3.27.

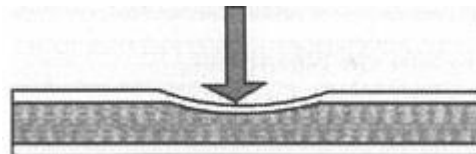


Figura 3.27 – Esmagamento local (Gay & Hoa, 2007).

Rotura por compressão: Neste caso, Figura 3.28, note-se que os painéis sanduíche, constituídos por fibras de aramida (Kevlar®) são cerca de duas vezes menos resistentes à compressão que os constituídos por fibras de vidro.

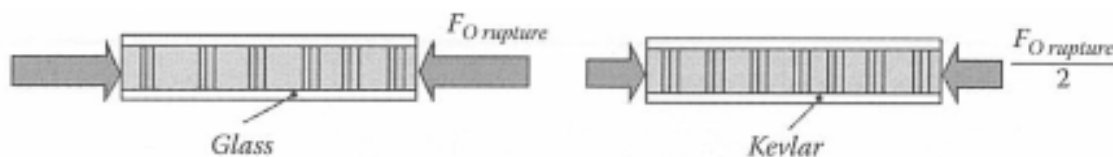


Figura 3.28 - Resistência à compressão de painéis sanduíche constituídos por Kevlar face aos constituídos por fibra de vidro (Gay & Hoa, 2007).

3.7.6 Problemas de fabrico e design

NINHO DE ABELHA: UM EXEMPLO DE MATERIAL DO NÚCLEO

Estes materiais conhecidos são feitos de células hexagonais que estão espaçadas de forma idêntica. Essa geometria pode ser obtida usando uma técnica relativamente simples. Várias camadas finas estão parcialmente coladas e são esticadas como se pode ver na Figura 3.29.

O material do ninho de abelha pode ser metal (aço, alumínio) ou não (folhas de poliamida, tecidos de vidro, entre outros).

Estas estruturas quando são metálicas são mais resistentes e mais baratas. Quando não metálicas os ninhos de abelha são insensíveis à corrosão e são bons isoladores térmicos. A Tabela 3.10 mostra as características mecânicas e geométricas de algumas estruturas em ninho de abelha, usando as notações da Figura 3.29.

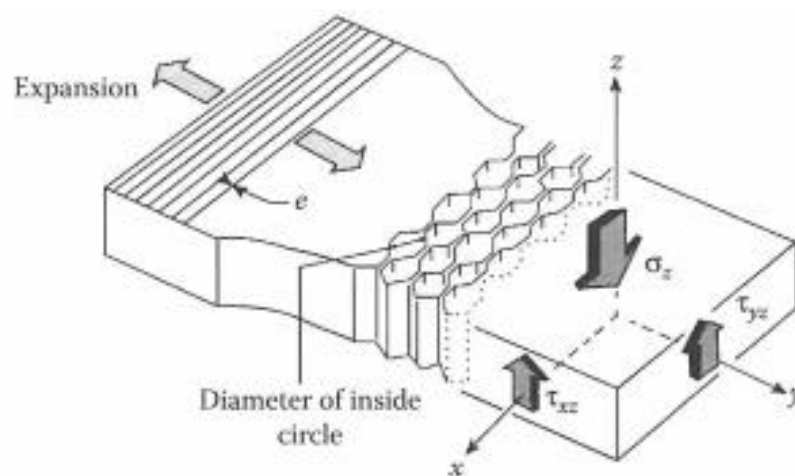


Figura 3.29 - Ninho de abelha (Gay & Hoa, 2007).

Tabela 3.10 – Propriedades dos materiais mais comuns utilizados nas estruturas ninho de abelha (Gay & Hoa, 2007).

	Bonded Sheets of Polyamide: Nomex ^a	Light Alloy AG3	Light Alloy 2024
Dia. (D): inscribed circle (mm)	6; 8; 12	4	6
Thickness e (mm)		0.05	0.04
Specific mass (kg/m ³)	64	80	46
Shear strength $\tau_{xz \text{ rup}}$ (MPa)	1.7	3.2	1.5
Shear modulus: G_{xz} (MPa) # 1.5 $G_{mat}(e/D)$	58	520	280
Shear strength $\tau_{yz \text{ rup}}$ (MPa)	0.85	2	0.9
Shear modulus: G_{yz} (MPa)	24	250	140
Compression strength: $\sigma_{z \text{ rup}}$ (MPa)	2.8	4.4	2

UTILIZAÇÃO DE PEÇAS DE ACOPLAMENTO

Quando é necessário transmitir cargas concentradas, dependendo da sua intensidade, é conveniente distribuí-la por um ou vários enxertos, como está indicado na Figura 3.30. A resina de enchimento mostrada na Figura 3.30, pode ser aligeirada através da incorporação de microesferas fenólicas com uma densidade resultante para a resina de 700 a 900 kg/m³ e tensão de rotura da ordem dos 35 MPa, Figura 3.31.

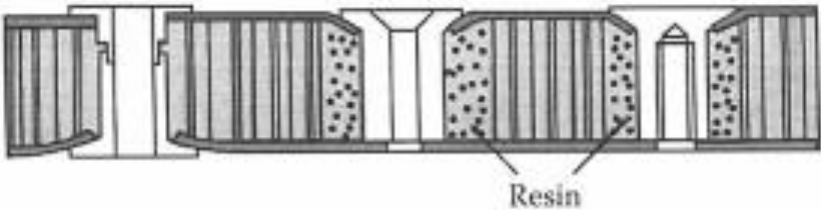


Figura 3.30 - Colocação de enxertos de resina para acoplamento de peças (Gay & Hoa, 2007).

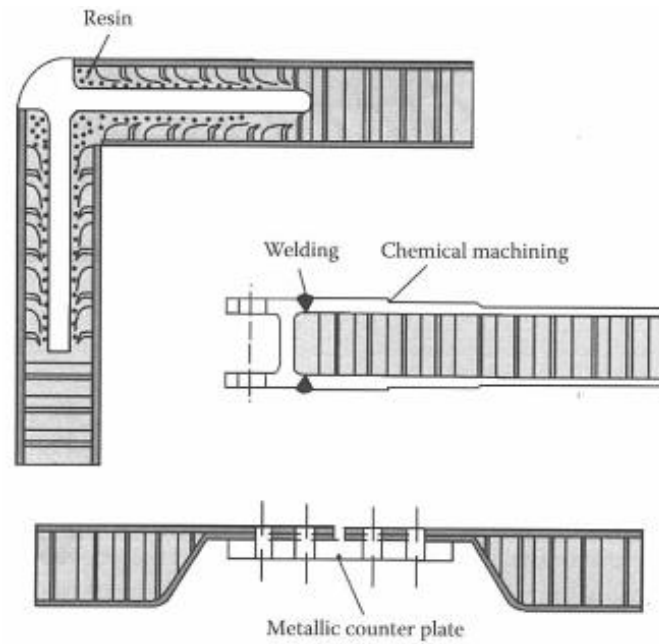


Figura 3.31 - Algumas formas de ligar painéis sanduíche (Gay & Hoa, 2007).

REPARAÇÃO DAS FACES DE LAMINADO

Para materiais sanduíche do tipo “laminados/ninho de abelha”, a reparação de dano local é relativamente simples. Consiste em remendar as camadas de laminado. A configuração na zona de reparação é apresentada na Figura 3.32.

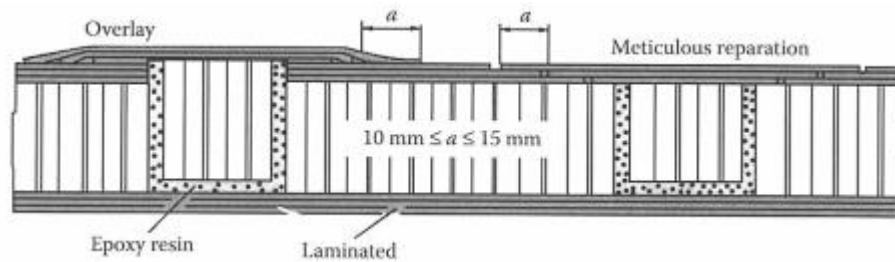


Figura 3.32 - Reparação de estruturas sanduíche (Gay & Hoa, 2007).

3.7.7 Controlo de qualidade não destrutivo

Para além de serem usados os métodos clássicos de controlo de defeitos superficiais, que permitem a reparação de delaminagens exteriores, dos laminados das faces dos painéis sanduíche, usando as seguintes técnicas podemos identificar e reparar defeitos internos devido ao fabrico ou danos em condições de funcionamento. Esses defeitos podem implicar colagem imprópria, delaminagens e inclusões. Os principais métodos não destrutivos estão presentes na Figura 9.15 e Figura 9.16, no ANEXO C.

Quando uma estrutura compósita (por exemplo um reservatório de pressão) é sujeita a carga, muitas microfissuras podem aparecer no interior da parede da estrutura. As microfissuras na resina, quebra do reforço, e descolagem entre a fibra e a matriz podem ocorrer mesmo dentro do limite admissível de cargas. Estas roturas criam ondas acústicas que se propagam para a superfície da peça. Elas podem ser detetadas e analisadas se forem utilizados sensores de emissões acústicas (Figura 9.17, ANEXO C).

O número de picos bem como a duração e amplitude do sinal pode ser usado para indicar a integridade da peça. Além disso, o número de picos pode ser usado para prever a fratura da peça (através da alteração do declive da curva na Figura 9.18, no ANEXO C).

4 Seleção de Material e Forma

Nesta fase do trabalho interessa utilizar uma abordagem mais específica que a utilizada no capítulo 3, de forma a irmos de encontro à resolução do problema apresentado no título do trabalho, neste capítulo a escolha do material está, já, intrinsecamente associada ao projeto pretendido.

É sobejamente conhecido que o material tradicional utilizado nos chassis automóveis é o aço ou mais recentemente o alumínio de forma a reduzir o peso. Os materiais compósitos surgem neste início de século XXI, na indústria automóvel, quer pelas suas características de liberdade de design, quer pela sua densidade baixa. Tais atributos podem, em diversas situações, mostrar-se mais úteis que a elevada rigidez do aço a baixo custo.

A escolha do material é um dos pontos fundamentais de um projeto estrutural. Com a escolha adequada pode-se conseguir uma estrutura muito mais leve, mais resistente e mais económica. Assumindo idêntica importância, a forma a ser dada aos componentes estruturais, ou seja, o perfil utilizado, nas “vigas” constituintes do chassi poderão, para a mesma quantidade de material, conferir bastante mais rigidez ou maior facilidade de produção desse design. Interessa aqui inserir, então, um novo conceito que será utilizado neste capítulo, o conceito de eficiência. Neste contexto entende-se por eficiente, para uma determinada solicitação, a secção que utiliza o mínimo de material possível (Ashby, 2005). Podem-se conseguir eficiências superiores recorrendo, por exemplo, a painéis sanduíche. Serão consideradas apenas as formas básicas, isto é, tubulares, vigas em “I”, vigas em “U”, cantoneiras “L”, triangulares, quadradas, entre outras. Não se optará, neste projeto, por formas complexas, ou seja, por um conjunto de duas formas de modo a não complicar o design no processo de fabrico do chassi, o que iria complicar muito a construção da estrutura, limitar mais as escolhas e dificultar o cálculo e desenho.

Sendo o alvo de estudo um automóvel, quer os custos envolvidos na sua produção, quer o seu peso final, bem como outras características essenciais que não estão diretamente associadas à construção do chassi, são tópicos essenciais que ditarão a escolha do material utilizado, uma vez que sendo escolhido um material que tenha um custo de aquisição e processamento bastante barato, consegue-se um produto final a um preço acessível e cada vez mais é esse o fator que dita a escolha. Cabe então, por último, ao engenheiro utilizar esse material de preço acessível e manipulá-lo de forma a conseguir, também, um chassi que no mínimo, dê as mesmas garantias que a estrutura em aço daria para o mesmo automóvel dado que este é um dos elementos com mais importância a nível de segurança.

4.1 Seleção de Material

A seleção do material a ser utilizado depende de várias características que serão abordadas neste subcapítulo. Os diagramas relativos à seleção de material tendo em conta os aspetos e fatores abordados neste ponto serão apresentados no ANEXO A, pois são muitos e extensos, o que tornaria menos apelativa a leitura deste texto.

4.1.1 Módulo de Young

Uma das principais características para o design de uma estrutura é a sua rigidez. É uma propriedade intrínseca do material que depende da sua composição química e da sua microestrutura. Assim, o Módulo de Young ou Módulo de Elasticidade definem a rigidez de um determinado material, propriedade esta que é absolutamente necessária para garantir a integridade de uma estrutura que está sujeita a cargas quer estáticas quer dinâmicas. Desta forma, o desafio passa por obter um material com a maior rigidez possível, tendo em conta a menor densidade possível, Figura 4.1. Quanto mais rígido for o material menor deformação este sofrerá em funcionamento, como tal menos sujeito estará a condições extremas de elevados deslocamentos que colocam sempre os componentes em risco. Recorde-se que para um dado material e uma dada solicitação unidirecional: $\sigma = E \cdot \epsilon$, como tal para a mesma rigidez (E) quanto maior a deformação (ϵ) maior será a tensão (σ) imposta ao material, condição que se pretende evitar.

Com auxílio à Figura 9.2 (Anexo A.1) é fácil observar que a região de escolha do material deve-se situar o mais possível à esquerda e em cima, na denominada “*Search region*”, no sentido da seta. As linhas a tracejado definem um índice de material definido em Ashby (2005) como sendo, $M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$ para vigas de secção quadrada e $M = \frac{E^{1/3}}{\rho}$ quando se fixa uma dimensão e a espessura é variável. Segundo o mesmo autor, este índice provém da busca por um índice que permita ser maximizado ou minimizado para uma mais fácil escolha do material adequado. Dessa forma, e sabendo que para a aplicação em questão os principais modos de solicitação são momentos fletores e torsões, como tal e para resistir a elevados momentos fletores e torsões as vigas parecem ser a escolha lógica devido à grande quantidade de material que apresentam distante do seu centróide, o que faz com que o seu momento de segunda ordem seja muito elevado, no eixo perpendicular às principais solicitações. De forma a maximizar a nossa escolha interessa encontrar a menor massa que cumpra os requisitos, equação (1)

$$m = AL\rho \quad (1)$$

no Anexo B.4 é possível ver as equações de rigidez para uma viga elástica sujeita a diferentes solicitações e condições fronteira. Ashby (2005), através da equação (2) define rigidez (*stiffness*) S de uma viga elástica que, para fazer face às solicitações, deve ter uma rigidez superior a:

$$S = \frac{F}{\delta} \geq \frac{C_1 EI}{L^3} \quad (2)$$

onde E é o módulo de Young, C_1 é a constante que depende da distribuição da carga e das condições fronteira da viga e I é o momento de segunda ordem da secção, que, para uma viga de secção quadrada (Anexo B.1) é definido pela equação (3)

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{A^2}{12} \quad (3)$$

a rigidez S e o comprimento L são especificados; a área da secção A é livre. Podemos reduzir a massa da viga m reduzindo A , mas notando que o limite de rigidez continua a ser garantido. Usando estas duas equações para eliminar A na equação (1) para a massa, equação (4)

$$m \geq \left(\frac{12S}{C_1} \right)^{\frac{1}{2}} (L^3) \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (4)$$

os termos entre parêntesis, da equação (4), estão ordenados: requisitos funcionais, geometria e material. Os melhores materiais para uma viga leve, rígida, são esses com os mais pequenos valores de $\rho/E^{1/2}$. Tal como vimos antes, vamos inverter isto para procurar os maiores valores do índice de material, para vigas de secção quadrada, equação (5)

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (5)$$

e para vigas de secção retangular com uma dimensão fixa e outra variável o índice de material M toma a equação (6).

$$M = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (6)$$

Na Figura 9.1 (Anexo A.1) é possível observar as diferentes inclinações das retas que permitem escolher o material adequado consoante a geometria que se pretende (dada pelo coeficiente $1/M$). O canto superior esquerdo da figura diz-nos que tipos de materiais se podem seleccionar para uma menor massa e maior rigidez possível (Ashby, 2005).

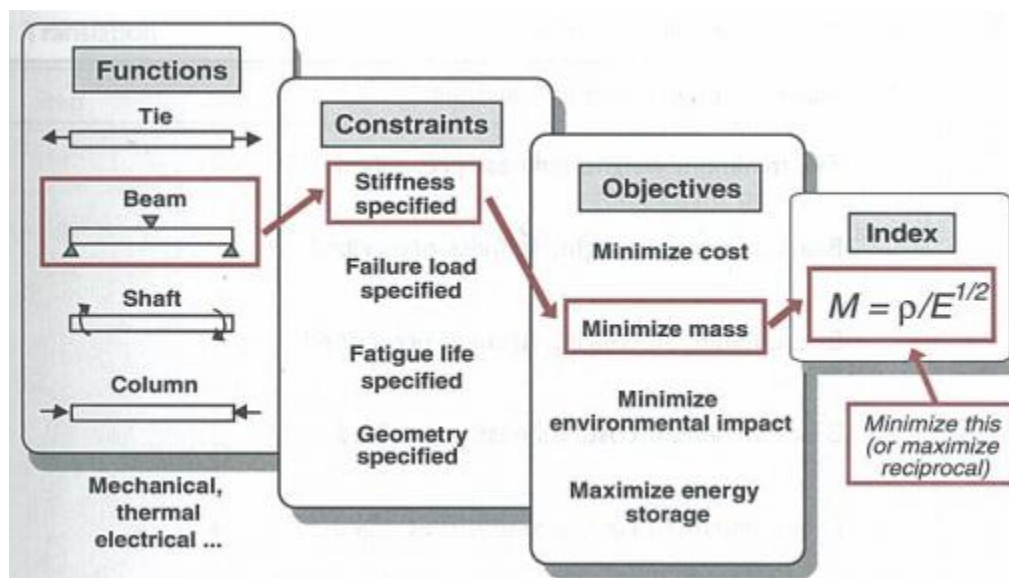


Figura 4.1 - Diagrama da escolha do índice de material consoante a aplicação requerida (Ashby, 2005).

4.1.2 Tensão de rotura

Enquanto o módulo de Young é uma quantidade bem definida, a tensão de “rotura” não tem um só valor, isto porque não podemos tomar o sentido lato da palavra “rotura”, neste caso a tensão de rotura refere-se no caso de alguns metais e alguns polímeros à *tensão de cedência* (*yield strength*), para cerâmica frágil ao módulo de rotura (*modulus of rupture*), para o caso de elastómeros temos a *tensão ao rasgamento* (*tear-strength*), para compósitos é denominada *tensão de rotura à tração* (*tensile failure strength*). Para denominar todas estas nomenclaturas será utilizado o índice σ_f (Ashby, 2005). As figuras relativamente a este tópico estão presentes no Anexo A.2.

4.1.3 Tenacidade à fratura

A resistência à propagação de uma fenda é medida pela tenacidade à fratura, K_{1C} . É representada na Figura 9.6 do Anexo A.3 o diagrama que relaciona o fator K_{1C} com o módulo de Young. O intervalo de valores é muito grande, entre cerca de 0,01 e 100 MPa.m^{1/2}. Aos menores valores correspondem materiais mais frágeis que, quando carregados, mantêm-se elásticos até à fratura. Para estes que têm um comportamento linear-elástico a mecânica da fratura funciona bem e o índice de tenacidade K_{1C} é uma propriedade bem definida. Para o limite superior estão os materiais mais resistentes, os quais mostram uma plasticidade substancial antes da rotura. Para estes últimos os valores de K_{1C} são aproximados, através do Integral-J e do COD (*crack opening displacement* - δ_c), eles são úteis para se conseguir atribuir uma classificação aos materiais. A Figura 9.6 mostra, ainda, a razão para a predominância dos metais na engenharia; quase todos eles têm valores de K_{1C} acima de 20 MPa.m^{1/2}, que é o valor mínimo para o design convencional (Ashby, 2005).

4.1.4 Resistência à fadiga

Um dos aspetos mais importantes que influenciam o comportamento à fadiga dos materiais compósitos é o tipo de material. A resistência à fadiga aumenta com o módulo de elasticidade das fibras que, no caso dos compósitos unidirecionais desempenham um papel crucial no comportamento à fadiga. As fibras de alta rigidez, como é o caso do carbono e do boro, limitam a deformação no compósito e evitam as deformações elásticas e viscoelásticas na matriz que são precursoras do dano. Por outro lado, as fibras de baixo módulo, como é o caso das fibras de vidro, permitem a existência de deformações suscetíveis de originar dano prematuro na matriz. As fibras aramídicas apresentam um comportamento intermédio entre os dois casos anteriores, uma vez que as próprias fibras são afetadas pela solicitação. No que respeita às resinas, o fator preponderante é a deformação à rotura. As resinas epoxídicas apresentam o melhor comportamento à fadiga que se justifica pela sua tenacidade, durabilidade, boa resistência mecânica, baixa contração durante o processo de cura e boa adesão com as fibras, nomeadamente com as de vidro (Moura *et al*, 2011).

4.1.5 Custos

Outra característica não menos importante é o custo dos materiais a serem aplicados. Assim sendo, usado o material o mais barato possível, desde que esse dê as garantias mínimas, possivelmente será uma boa escolha, e cabe ao engenheiro a tarefa de utilizar esse material com a forma correta (abordado no capítulo 4.2), de modo a tirar o melhor partido possível desse material. No design para o mínimo custo, a seleção de material é guiada por índices que envolvem o módulo, a tensão de rotura e o seu custo por unidade de volume. Para usar um fator corretivo para a inflação e para as unidades da moeda em vigor, definimos um *custo relativo por unidade de volume* $C_{v,R}$, equação (7).

$$C_{v,R} = \frac{\text{Custo/kg} \times \text{Densidade do material}}{\text{Custo/kg} \times \text{Densidade de uma haste de aço esbelta}} \quad (7)$$

Segundo Ashby (2005) no ano em que escreveu o livro uma haste de aço custava cerca de 0,3 US\$/kg, ou seja, cerca de 0,24 €/kg, sendo assumido que nessa altura o Euro (€) valia cerca de 1,25 (US\$) US Dólar (Portal Brasil, 2016). Para fazer uso dos diagramas feitos por Ashby (2005) será usada como moeda o Dólar, no entanto, note-se que, sendo os cálculos realizados de forma adimensional e existindo uma relação de proporcionalidade próxima de um entre as duas moedas, então os gráficos seriam idênticos aos que serão apresentados no Anexo A.4. Algumas notas sobre a utilização dessas ferramentas estão presentes junto das imagens.

4.2 Seleção de formas

A forma dada a um material é usada para lhe conferir mais resistência e rigidez numa determinada direção, ou em várias. É sabido que, por exemplo, para o caso de duas vigas com igual área e material, e, portanto, igual massa, de secção retangular (a , b), é diferente colocar a viga apoiada sobre a face a ou sobre a face b . Igualmente se sabe que para a mesma área a viga terá comportamentos diferentes se tiver secção circular, quadrada, oca, elíptica, em “T”, em “I”, etc. Este comportamento deve-se à influência do momento estático de segunda ordem, I , na direção perpendicular à solicitação, que, em termos muito gerais, será tanto maior quanto mais material da secção estiver afastado do eixo neutro. Um exemplo prático que facilmente verifica esta afirmação é, por exemplo, o caso do equilíbrio de um escadote em pé com as suas “pernas” fechadas, e o equilíbrio do mesmo escadote com as suas “pernas” abertas. O escadote aberto aumenta o momento de segunda ordem, relativamente ao escadote fechado, e é essa condição que lhe confere o equilíbrio necessário. Neste simples exemplo se percebe a importância de para a mesma quantidade de material, dispô-la de maneira favorável pode mudar o resultado de forma drástica e fazer a diferença entre uma estrutura eficiente e uma ineficiente.

As diferentes formas dadas aos materiais podem ter diferentes propósitos que não somente a resistência mecânica. Uma estrutura esbelta auxilia à libertação de calor, já uma forma celular ajuda a conservá-lo. Existem formas para maximizar capacitância elétrica, para conservar um campo elétrico, para controlar reflexão ótica, difração e refração, formas para refletir um som, ou para absorvê-lo. A forma é ainda usada para mudar a maneira com que se sente determinado material, colocando-o mais macio, mais áspero, mais aderente ou mais escorregadio (Ashby, 2005).

Neste capítulo é explorada a maneira de utilizar o material da forma mais eficiente possível, explorando as melhores geometrias, recorrendo a diferentes fatores. Materiais com a forma certa suportam melhor flexão, torção e esforços axiais de compressão (a tração, unidirecional, é independente da forma, e somente função da área). Secções tubulares, em “I”, triangulares, quadradas, circulares, entre outras, serão consideradas “formas simples”. São possíveis obter eficiências ainda superiores no caso de painéis sanduíche e de estruturas, como treliças, por exemplo.

O fator de forma é uma medida da eficiência do material a ser utilizado (Ashby, 2005).

4.2.1 Fator de forma

As cargas aplicadas aos componentes podem ser decompostas em cargas axiais, cargas que geram momentos de flexão e cargas que exercem torção. Normalmente, um desses modos domina sobre os outros e, como tal, existem formas criadas de maneira a resistirem, essencialmente, a cada um desses esforços em separado. Assim, podemos afirmar que, cabos resistem a esforços de tração, vigas carregam momentos de flexão, veios suportam torção; e colunas são desenhadas utilizadas para suportar compressão. A Figura 4.2, apresenta essas solicitações elementares, bem como as formas que lhes resistem melhor.

Como foi dito a resistência a esforços de tração é somente função da área. O mesmo não acontece na flexão, em que se verifica que as secções “ocas” ou em “I” são melhores que secções sólidas da mesma área transversal. A torção, de idêntica maneira, depende das formas: tubos circulares, por exemplo, são mais eficientes que secções sólidas ou secções em “I”. Para se poder caracterizar, e comparar isto, necessitamos de uma medida – uma forma de medir a eficiência estrutural de uma secção, independente do material (que foi assunto do capítulo 4.1).

Uma maneira óbvia é dada pelo quociente adimensional, ϕ , que é definido pela razão entre a rigidez ou resistência da forma da secção em estudo e uma referência ‘neutra’, que será considerada um sólido quadrado com a mesma área de secção, e a mesma massa por unidade de comprimento, que a forma da secção (Ashby, 2005).

FLEXÃO ELÁSTICA DE VIGAS

A rigidez à flexão S de uma viga é proporcional ao produto EI

$$S \propto EI$$

aqui E representa o módulo de Young e I o momento de segunda ordem da viga sobre o eixo que está a ser fletido (eixo do x), equação (8)

$$I = \int_{secção} y^2 dA \quad (8)$$

onde y é a distância de determinado ponto, pertencente ao elemento infinitesimal de área, dA , até ao eixo de flexão, x (Figura 4.2). Os valores para o momento de segunda ordem I e área A para secções elementares estão listados nas duas primeiras colunas da Tabela 9.1, Anexo B.1. Os valores para as formas complicadas são aproximados, mas completamente adequados para o objetivo deste trabalho. O momento de segunda ordem, I_o , para uma viga de secção quadrada de referência, de comprimento b_o e área de secção $A = b_o^2$ é dado pela equação (9)

$$I_o = \frac{b_o^4}{12} = \frac{A^2}{12} \quad (9)$$

(aqui e sempre que utilizado, o índice ‘o’ refere-se a uma secção sólida quadrada). A rigidez de flexão, equação (10), de uma dada forma difere da rigidez de flexão de uma secção quadrada com a mesma área A , o fator ϕ_B^e onde

$$\phi_B^e = \frac{S}{S_o} = \frac{EI}{EI_o} = \frac{12I}{A^2} \quad (10)$$

o fator ϕ_B^e é designado *fator de forma para flexão elástica*. Note-se que é adimensional, visto que I (m^4) e A^2 (m^2)², e, portanto, A^2 (m^4). Este fator depende apenas da forma e não depende da escala: quer seja uma viga pequena ou grande tem o mesmo valor de ϕ_B^e se a sua forma da secção for a mesma, Figura 4.3 (Ashby, 2005).

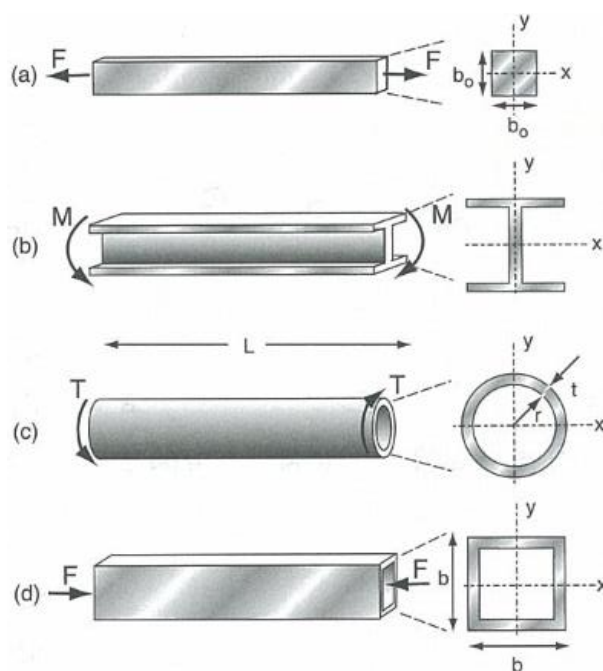


Figura 4.2 - Modos elementares de solicitações e formas-seções utilizadas para suportar esses esforços: a) tração; b) flexão; c) torção; d) compressão (Ashby, 2005).

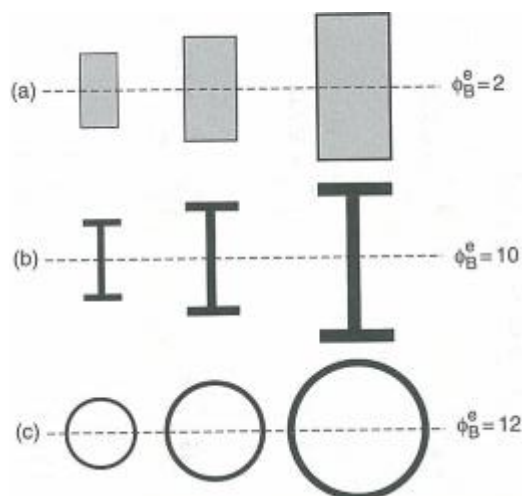


Figura 4.3 - a) Um conjunto de secções retangulares com $\phi_B^e = 2$; b) um conjunto de secções em “I” com $\phi_B^e = 10$; c) um conjunto de tubos com $\phi_B^e = 12$. Membros de determinado grupo são ampliações ou reduções dos outros (Ashby, 2005).

Os fatores de eficiência das formas ϕ_e para formas elementares, calculados a partir das expressões para A e I na Tabela 9.1, estão listados na primeira coluna da Tabela 9.2, ANEXO B. As secções sólidas equiaxiais (circulares, quadradas, hexagonais, octogonais) têm valores próximos de 1 – para casos práticos podemos assumir o valor 1. Se a secção for oca ou em “I”, as coisas serão diferentes; um tubo de parede fina, ou uma viga em “I” delgada podem atingir valores de $\phi_B^e = 50$ ou mais. Uma viga com $\phi_B^e = 50$ é 50 vezes mais rígida que uma viga sólida de igual massa. Na Figura 4.4 está representado o valor de I face a A para diferentes valores de ϕ_B^e (equação (10)). A linha para $\phi_B^e = 1$ descreve a secção quadrada da viga de referência. Os valores $\phi_B^e = 10$ e $\phi_B^e = 100$ descrevem formas mais eficientes, como se pode

ver pelos ícones no canto inferior esquerdo da Figura 4.4, em que o eixo de flexão é horizontal. Mas nem sempre alta rigidez é o que se pretende, depende da aplicação. Molas, suspensões, cabos, e outras estruturas que devem fletir e ter uma elevada resistência à tração, necessitam de valores baixos de rigidez à flexão, nesse caso procuramos valores baixos do fator de forma. Isso é conseguido por serem usadas formas em que o material esteja mais espalhado, num plano que contenha o eixo sobre o qual está a ser fletido, tal como é sugerido para as linhas $\phi_B^e = 0,1$ e $\phi_B^e = 0,01$. Na Tabela 4.2, é possível ver os limites empíricos para as solicitações mais importantes (flexão e torção). Os índices ϕ_T^e , ϕ_B^f , ϕ_T^f não foram abordados neste texto, pois como foi dito na introdução do capítulo 4, considerando o modo predominante de solicitação a flexão (*Bending*), a escolha dos fatores de forma será feita com base nisso. O índice ‘f’ corresponde à zona plástica, e à rotura, que não interessa abordar neste texto (failure). O índice ‘e’ representa o domínio elástico e o ‘T’ representa a torção, Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Definição dos símbolos, adaptado de Ashby (2005).

Symbol	Definition
E	Young's modulus of the material of the section (GPa)
σ_f	Yield or failure strength of the material of the section (MPa)
ρ	Density of the material of the section (Mg/m^3)
A	Cross-sectional area of section (m^2)
I	Second moment of area of the section (m^4)
I_0	Second moment of area of the square reference section (m^4)
ϕ_B^e	Macro shape factor for elastic bending deflection (—)
ϕ_B^f	Macro shape factor for onset of plasticity or failure in bending (—)
ϕ_T^e	Macro shape factor for elastic torsional deflection (—)
ϕ_T^f	Macro shape factor for onset of plasticity or failure in torsion (—)
(EI)	Essential term in bending stiffness (N.m^2)

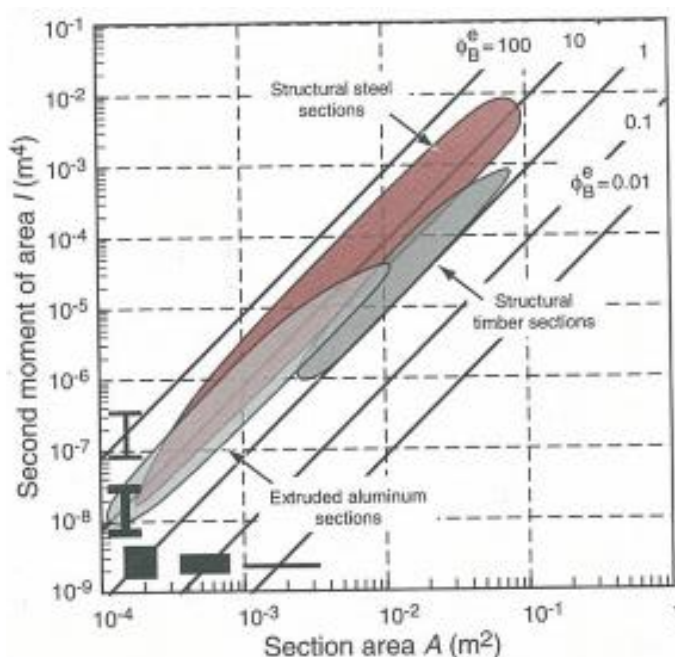


Figura 4.4 – Momento de segunda ordem, I , face à área da secção, A . Estruturas eficientes têm altos valores do rácio I/A^2 ; estruturas ineficientes (que fletam facilmente) tem baixos valores. Secções de estruturas reais tem valores de I e A que se encontram nas zonas sombreadas. Existem limites para os valores de A e da eficiência da forma ϕ_B^e que dependem do material (Ashby, 2005).

Tabela 4.2 - Valores máximos empíricos para os fatores de forma (Ashby, 2005).

Material	$(\phi_B^e)_{\max}$	$(\phi_T^e)_{\max}$	$(\phi_B^f)_{\max}$	$(\phi_T^f)_{\max}$
Structural steel	65	25	13	7
6061 aluminum alloy	44	31	10	8
GFRP and CFRP	39	26	9	7
Polymers (e.g. nylons)	12	8	5	4
Woods (solid sections)	5	1	3	1
Elastomers	< 6	3	→	—

4.3 Selecionar conjuntamente material e forma

Os índices permitem a comparação e escolha de combinações material-forma. A conclusão do capítulo 4 é em torno disso.

4.3.1 Escolhendo conjuntamente por cálculos

Tomemos como exemplo a escolha de um material para uma viga com uma forma bastante rígida e massa reduzida. Quatro materiais estão disponíveis na Tabela 4.3, cada um com as suas propriedades e valores modestos para os seus índices de forma, ϕ_B^e . Procuramos a combinação com os maiores valores do índice M_1 da equação (11).

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho} \quad (11)$$

Tabela 4.3 - Seleção de material para uma viga leve e rígida (Ashby, 2005)

Material	ρ (Mg/m ³)	E(GPa)	ϕ_B^e	$E^{1/2}/\rho$	$(\phi_B^e E)^{1/2}/\rho$
1020 Steel	7.85	205	20	1.8	8.2
6061-T4 Al	2.7	70	15	3.1	12.0
GFRP (isotropic)	1.75	28	8	2.9	8.5
Wood (oak)	0.9	13.5	2	4.1	5.8

Esse valor identifica as combinações de material-forma com a menor massa para uma dada rigidez. A penúltima coluna da tabela mostra o índice que já foi inserido na equação (5), $E^{1/2}/\rho$: a madeira (*wood*) apresenta o maior valor, mais de duas vezes superior ao aço (*steel*). Mas quando se molda cada material de encontro à forma mais eficiente (última coluna), a madeira tem o menor valor de M_1 – mesmo o aço é superior; a liga de alumínio vence, ultrapassando o aço e a fibra de vidro (GFRP).

4.3.2 Escolhendo conjuntamente por gráficos

O índice de material para flexão elástica, equação (11) pode ser reescrito, equação (12)

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho} = \frac{(E/\phi_B^e)^{1/2}}{\rho/\phi_B^e} = \frac{E^{*1/2}}{\rho^*} \quad (12)$$

a equação representa: um material com módulo E e densidade ρ , quando estruturado, pode ser encarado como um novo material de módulo e densidade dados pela equação (13)

$$E^* = \frac{E}{\phi_B^e} \text{ e } \rho^* = \frac{\rho}{\phi_B^e} \quad (13)$$

a representação E - ρ é apresentada esquematicamente na Figura 4.5. As “novas” propriedades do material podem ser representadas aí. Introduzindo, por exemplo $\phi_B^e = 10$, move o material M para o canto inferior esquerdo, ao longo da linha de declive 1, desde a posição E, ρ para a posição $E/10, \rho/10$ como mostrado na figura, no sentido da seta. O critério de seleção está mostrado na figura, tal como antes: um valor constante de índice $E^{1/2}/\rho$ por exemplo, representado como uma linha tracejada de declive 2. A introdução da forma moveu o ponto do material de uma posição abaixo dessa linha para uma posição superior; a sua performance foi melhorada (Ashby, 2005). A torção elástica de veios pode ser tratada da mesma forma embora não seja alvo deste texto.

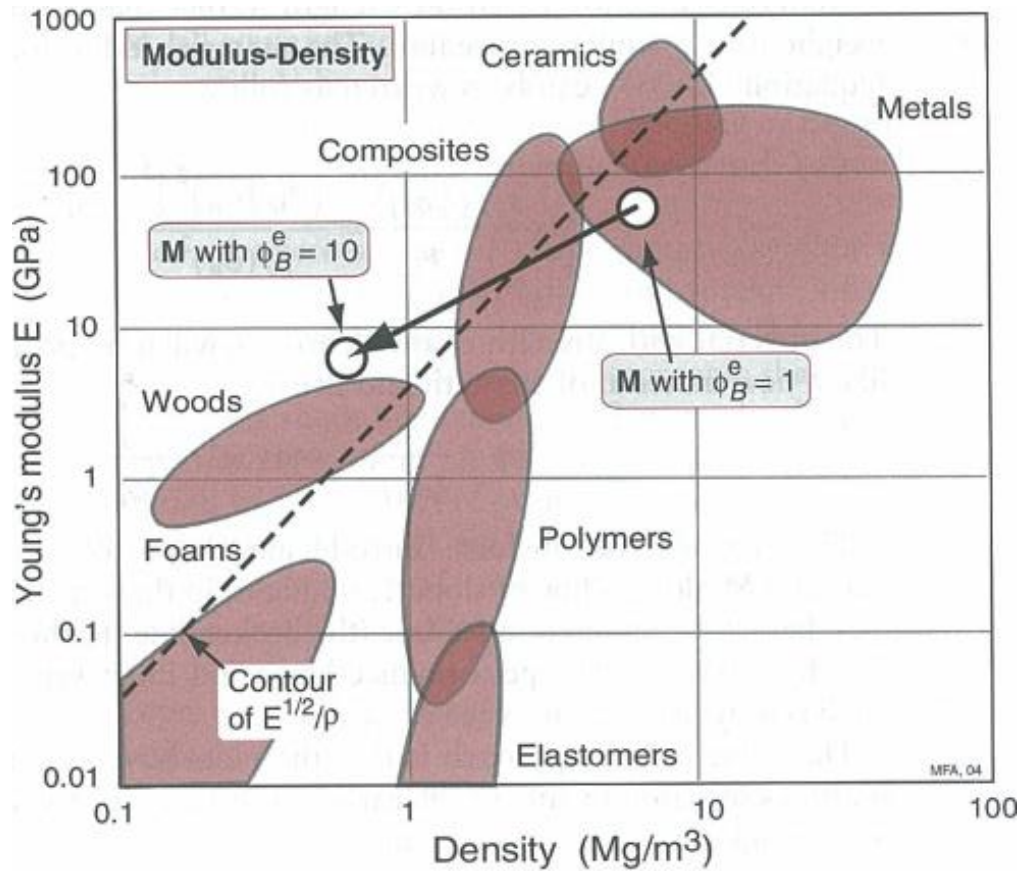


Figura 4.5 – O material estruturado comporta-se como um novo material de módulo $E^* = E/\phi_B^e$ e densidade $\rho^* = \rho/\phi_B^e$, movendo-se de uma posição abaixo da linha tracejada para uma posição acima (Ashby, 2005).

4.4 Conclusões

O projetista tem dois grupos de variáveis com os quais pode otimizar o desempenho de um componente solicitado: as propriedades do material e a forma da secção. Elas não são independentes. A melhor escolha de material, numa dada aplicação, depende também da forma na qual está disponível ou até que limites este pode ser formado.

A contribuição da forma isolada pode ser definida por 4 fatores de forma. O primeiro e único abordado, ϕ_B^e , é a flexão elástica de vigas; os restantes não foram abordados e são eles, ϕ_T^e , para a torção elástica de veios; ϕ_B^f , para a flexão plástica, até rotura, de vigas; ϕ_T^f , para a torção plástica, até rotura, de veios (Tabela 4.1). Os fatores de forma são números adimensionais que caracterizam a eficiência do uso dos materiais consoante a solicitação. Eles tomam o valor 1 para uma secção sólida quadrada. Com esta definição, todas as secções sólidas equiaxiais (cilindros sólidos, hexagonais e outras secções poligonais) têm fatores de forma próximos de 1, mas formas eficientes são aquelas que dispersam o material longe do eixo sobre o qual está a ser fletida ou torcida (vigas em “I”, secções ocas, entre outras) e têm valores bastante mais elevados. As formas mais recorrentes estão presentes na Tabela 9.2.

Os fatores de forma são limitados, na prática, às condições nas quais estes são concebidos, e restritos aos limites de encurvadura local. Estes limites podem ser representados num “gráfico de forma” que combinado com o material dá origem a um “mapa dos 4 quadrantes”, apresentado no Anexo B.3, permitem explorar os benefícios de combinar forma e material. Enquanto esta é uma alternativa mais educacional, há uma alternativa mais eficiente: desenvolver índices que incluem os fatores de forma. A melhor combinação forma-material para uma viga leve com uma rigidez elástica de flexão imposta, é a que maximiza o índice de material, M_1 , e o índice que satisfaz a procura por uma viga leve com tensão de rotura imposta, M_3 .

$$M_1 = \frac{(E\phi_B^e)^{1/2}}{\rho} \qquad M_3 = \frac{(\phi_B^f\sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

Combinações semelhantes envolvendo ϕ_T^e e ϕ_T^f dão-nos o veio mais leve e rígido ou mais forte, Tabela 4.4. Aqui o critério de “desempenho” é o que encontra um dado design ao mínimo peso. Outras combinações de material-forma maximizam outros critérios de desempenho: minimizar custos, por exemplo, ou maximizar o armazenamento de energia (Ashby, 2005).

Tabela 4.4 - Definição dos fatores de forma (os valores A, I, K, Z e Q estão presentes na Tabela 9.1)

Design constraint ^a	Bending	Torsion
Stiffness	$\phi_B^e = \frac{12I}{A^2}$	$\phi_T^e = \frac{7.14K}{A^2}$
Strength	$\phi_B^f = \frac{6Z}{A^{3/2}}$	$\phi_T^f = \frac{4.8Q}{A^{3/2}}$

5 Considerações antes de projetar

Sendo o alvo de estudo deste trabalho o design do chassi de um automóvel, para ser construído em material compósito, é necessário saber mais alguma coisa sobre certos aspetos e limitações dos compósitos, quando aplicados em certas estruturas. Para serem aplicados de maneira correta, têm que ser conhecidos, não só, de forma isolada, mas também o seu comportamento caso assumam formas curvas, ligações entre eles, entre outras situações que são esperadas encontrar num projeto desta natureza, já que é sabido que não se conseguirá construir um chassi numa peça só, o que seria a situação ideal, para conferir maior resistência mecânica, maior durabilidade e maior facilidade de conceção.

O projeto tem que ser viável em termos de exequibilidade, isto é, tendo em conta o material usado, é necessário verificar se é possível fabricar as formas desenhadas, e quais as dificuldades intrínsecas a determinada escolha.

É, ainda, necessário ter em atenção que normalmente um chassi de um utilitário comum, como é o caso, não é verificado regularmente na maioria dos casos e, como tal, torna-se necessário conceber um projeto que garanta uma elevada durabilidade, que não deixe nada a desejar aos tradicionais feitos em aço. Já é esperado que o chassi seja somente verificado em caso de acidente, e provavelmente não será verificado em todos os acidentes, pelo que para o projetista se salvaguardar tem que pensar nisso e colocar este projeto do lado da segurança.

O chassi é a espinha dorsal de um automóvel, que tem por função suportar todos os componentes do veículo, como tal todos os esforços a que o automóvel estiver sujeito serão transmitidos ao chassi, isto irá ser visto com detalhe mais à frente.

5.1 Ligações em compósitos

A utilização generalizada de materiais compósitos leva à necessidade do estabelecimento de ligações entre diferentes componentes. Estas ligações são usualmente designadas por juntas, e podem ser utilizadas entre dois compósitos ou entre um compósito e um material de outro tipo. Uma ligação apenas é eficiente se for capaz de transmitir as cargas impostas aos dois componentes, mantendo a sua integridade estrutural sob qualquer tipo de solicitações e condições ambientais (humidade e temperatura) adversas. Em muitas reparações recorrem-se a juntas. Geralmente, as juntas levam a um aumento de peso da estrutura, originam problemas de fabrico na sua execução, criam zonas de potencial colapso e encarecem a estrutura final, deve assim ser restrito o seu uso ao mínimo possível. As ligações usadas nos materiais compósitos podem ser divididas em diferentes tipos (Moura *et al*, 2011):

- Ligações aparafusadas e rebitadas;
- Ligações coladas com adesivo;
- Ligações coladas por fusão do polímero base do compósito, exclusivas dos compósitos de matriz termoplástica devido à sua capacidade de reproprocessamento.

5.1.1 Ligações Aparafusadas e Rebitadas

Este tipo de ligações é das mais usadas com materiais compósitos, nomeadamente na indústria aeronáutica. As principais vantagens são (Moura *et al*, 2011):

- Permitem a montagem e desmontagem rápida dos componentes para verificação dos componentes, reparações ou substituição, sem danos assinaláveis (ligações aparafusadas);
- Não necessitam de preparar previamente as superfícies;
- Não são afetadas por variações de temperatura nem ambientes húmidos;
- Bom desempenho a solicitações de tração.

Como desvantagens salientam-se (Moura *et al*, 2011):

- A concretização do furo interrompe a continuidade das fibras e diminui a resistência dos substratos;
- A presença do furo origina concentração de tensões nos componentes, o que leva à existência de pontos críticos nessa zona, e pode levar à sua rotura;
- Acrescentam peso à estrutura;
- As características viscoelásticas dos polímeros promovem a relaxação de tensões, conduzindo à diminuição do pré-esforço de aperto e reduzindo assim, progressivamente, o desempenho da junta.

Existem dois tipos principais de ligações, ligações de sobreposição simples e de sobreposição dupla, Figura 5.1. Apesar da grande simplicidade das primeiras ligações, estas induzem flexão devido à excentricidade da carga, e como tal tem desempenhos cerca de 20% inferiores às ligações de sobreposição dupla (Moura *et al*, 2011).

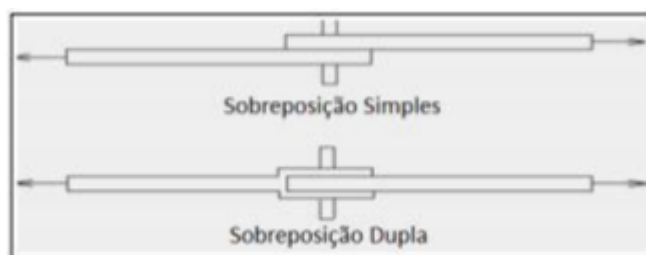


Figura 5.1 - Juntas com furo, de sobreposição simples e de sobreposição dupla (Teixeira, 2014).

Para além do tipo de junta, existem outros fatores que influenciam grandemente a sua resistência mecânica, são eles:

- Fatores geométricos, nomeadamente as relações e/d , w/d e t/d (Figura 5.2);
- Parâmetros do material, particularmente as orientações das camadas e as sequências de empilhamento;
- Parâmetros de fabrico, relacionados com a qualidade do furo e do material envolvente.

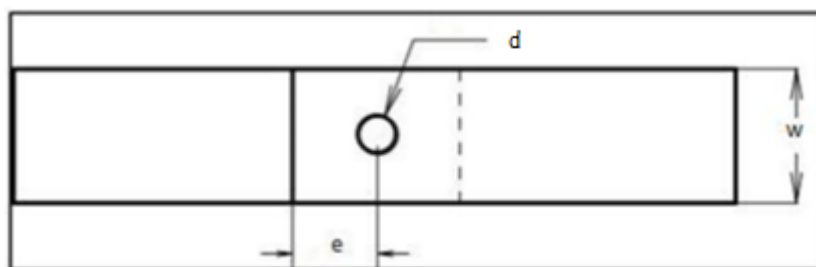


Figura 5.2 - Definição de parâmetros geométricos de uma junta (Moura *et al*, 2011).

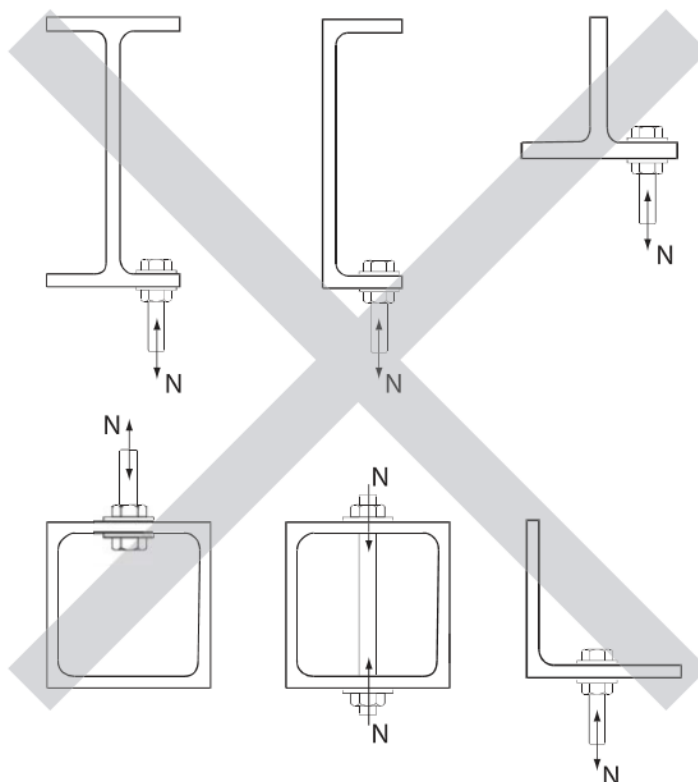


Figura 5.3 – Ligações e esforços a evitar em determinadas secções de materiais compósitos; in “<http://www.fiberline.com/>, consultado em 2016-07-25, 08:49”

A Fiberline (s.d.) prevê um guia de apoio para a utilização estrutural dos seus perfis onde, entre outras coisas, mostra que tipo de ligações aparafusadas devem ser evitadas, Figura 5.3, a não ser que sejam provadas como exequíveis por simulações de elementos finitos.

MODOS DE ROTURA

O modo de rotura de uma ligação aparafusada depende de diversas condições, tais como: a) o tipo de fibra; b) a sua orientação; c) sequência de empilhamento; d) das propriedades da matriz; e) da geometria da junta.

Em geral, consideram-se quatro tipos de modos de rotura das juntas com furo, Figura 5.4, que podem ou não surgir simultaneamente: a) corte; b) tração; c) clivagem; d) esmagamento localizado.

As roturas por corte e tração devem ser evitadas pois são catastróficas, isto é, dão-se subitamente. Assim sendo, deve-se projetar este tipo de ligações de modo que a rotura ocorra por esmagamento localizado, uma vez que esta não é catastrófica. Dessa forma é necessário que as relações geométricas e/d e w/d (Figura 5.2) sejam elevadas ($e/d > 3$ e $w/d > 6$), de modo a ocorrer esmagamento localizado, e a evitem-se roturas por corte ou tração. A resistência à tração do material pode ser melhorada na secção dos furos, aumentando o espaçamento entre estes e colocando mais de uma fila de elementos de ligação (parafusos, pinos, entre outros).

As roturas por corte e clivagem são habituais em laminados unidirecionais ou com grande parte das camadas alinhadas com a direção da solicitação. Um outro método utilizado para evitar a rotura por corte é o uso de camadas a $\pm 45^\circ$ (Moura *et al*, 2011).

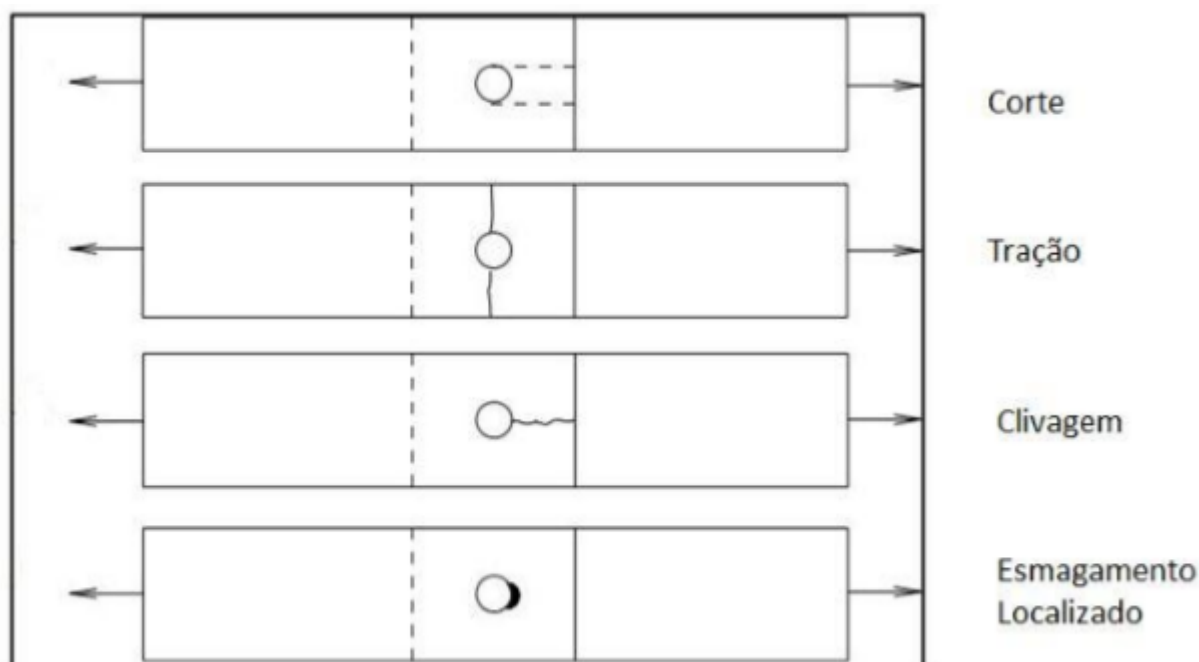


Figura 5.4 - Modos de rotura em juntas com furos (Teixeira, 2014).

5.1.2 Ligações coladas

As ligações coladas consistem na ligação de dois substratos através de um adesivo. As principais vantagens deste tipo de ligação relativamente às juntas com furos são (Moura *et al*, 2011):

- Distribuição da carga sobre uma maior superfície, o que aumenta a resistência à fadiga;
- O carácter viscoelástico do adesivo fomenta o amortecimento de vibrações;
- Diminuição do número de peças e do peso;
- Capacidade de vedação e de isolamento térmico;
- Facilidade de se conseguirem unir superfícies irregulares;
- Habitualmente é um processo mais económico e mais rápido.

Como desvantagens devemos conhecer (Moura *et al*, 2011):

- As superfícies necessitam ser previamente preparadas;
- Os ciclos de cura de alguns adesivos são extensos e requerem a aplicação de pressão e/ou temperatura;
- Sensibilidade às condições ambientais;
- Árdua inspeção da junta colada;
- São ligações permanentes, que ao serem desmontadas não permitem o reaproveitamento dos componentes sem os danificar;
- Processo de fabrico que necessita de um controlo rígido e mão-de-obra competente;
- Problemas de saúde provenientes da toxicidade e de segurança devido à flamabilidade da generalidade dos adesivos.

A ligação colada (Figura 5.5) mais frequente, devido à simplicidade de realização, é a junta de sobreposição simples, em que os esforços são transmitidos entre substratos por tensões de corte nos adesivos. No entanto, e tal como nas ligações aparafusadas ou rebitadas, a aplicação de cargas descentradas provoca flexão, que reduz a resistência da junta. Para evitar a flexão, utilizam-se frequentemente juntas de sobreposição dupla. As juntas de reforço simples ou duplo apresentam melhores desempenhos que as juntas de sobreposição simples. As juntas em degrau ou rampa apresentam as maiores resistências. No entanto, na prática, a dificuldade em maquinar os degraus ou a rampa esmorecem as referidas vantagens e tornam estes últimos métodos pouco viáveis relativamente às sobreposições ou reforços (Moura *et al*, 2011).



Figura 5.5 - Modos de ligações coladas mais comuns (Teixeira, 2014).

MODOS DE ROTURA

Identificam-se três modos de rotura distintos em juntas coladas de materiais compósitos (Figura 5.6): rotura coesiva no interior do adesivo, rotura adesiva na interface entre o substrato e o adesivo e rotura de um dos substratos.

A rotura coesiva ocorre quando o adesivo rompe, o que prova que a resistência interna do adesivo é inferior à aderência do adesivo ao substrato. A rotura de um dos substratos é demonstrativa de uma junta bem concebida.

Muitas vezes a rotura adesiva é confundida com a rotura coesiva, uma vez que em vários casos, em que se inspeciona o local de rotura de forma mais minuciosa, verifica-se a existência de uma fina camada de resina, e, portanto, estamos perante uma rotura coesiva (Moura *et al*, 2011).

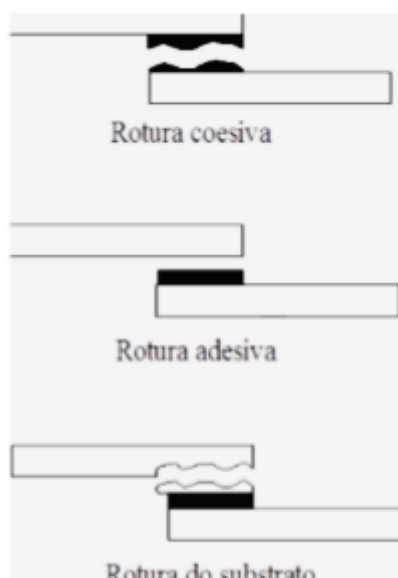


Figura 5.6 - Modos de rotura típicos das ligações coladas (Teixeira, 2014).

5.1.3 Ligações por fusão

Para além destes dois tipos de ligação, existe um tipo de ligação exclusivo dos compósitos de matriz termoplástica, que é a ligação por fusão, estabelecida por aplicação de calor e pressão apropriada, de forma a difundir o polímero pela interface. Este tipo de junta necessita de um ínfimo tratamento superficial; apresenta boa ductilidade e são reparáveis facilmente; tem boa resistência à humidade e boa resistência química; tem tempos de processamento e custos inferiores às juntas coladas com termoendurecíveis. A principal desvantagem deve-se à necessidade de obter calor e pressões por meios externos, que no caso de um processo automatizado requer equipamento apropriado (Moura *et al*, 2011).

6 Casos de Estudo

O chassi é um dos componentes de maior importância no que à segurança diz respeito. Assim, deve-se ter em conta a maior durabilidade possível, ou seja, este não se deve tornar menos seguro com o passar do tempo, pelo menos não o suficiente que comprometa a segurança dos passageiros. E deve estar desenhado de modo a absorver os choques que existam de forma a garantir a segurança e conforto dos ocupantes. No caso de um acidente frontal, por exemplo, é esperado que o chassi se necessário, se deforme, de modo a não transmitir o impacto total ao veículo, mas absorvendo parte da energia cinética na sua deformação. Por outro lado, a deformação prevista não deve ser demasiado grande, de modo a nunca colocar em risco a integridade física dos passageiros.

No chassi prevê-se uma grande rigidez na zona da transmissão de cargas dos pneus até ao chassi, de modo que os deslocamentos sejam mínimos para não causarem deformações irreversíveis no chassi. A dissipação desta energia tem que ser feita na sua maioria pelos pneus e pela suspensão do veículo. Neste ponto é de salientar que, muitas vezes, o veículo passa por irregularidades do piso a velocidades excessivas e o chassi tem que estar pronto para suportar, não só esse desnível do terreno, mas também a inércia da massa do próprio veículo que tem tendência a seguir a direção do solo, enquanto a suspensão empurra o chassi no sentido oposto.

É ainda esperado do chassi que garanta total integridade no caso de arranques bruscos, travagens bruscas, que em casos extremos podem ser comparados a algum impacto de outro automóvel, ou do automóvel contra algum obstáculo, móvel ou estático, em que a paragem do automóvel é muito mais imediata do que quando o condutor aciona o travão. O caso do arranque ou travagem pode ser assemelhado a um esforço axial, distribuído no eixo da frente (caso o veículo possua tração à frente, e sabendo que normalmente são, também, as rodas da frente que, no caso de travagem, suportam a maioria do peso do automóvel, já que as traseiras apresentam tendência a deslizar, e até são utilizados em boa parte dos veículos em circulação, travões hidráulicos à frente e travões de cintas atrás que, por si só, têm piores resultados que os hidráulicos).

Por último, espera-se ainda que o automóvel seja capaz de curvar, a velocidades limites mesmo que este esteja no seu limite de carga (com ocupantes e um peso considerável na mala). Assim que ficar garantido que consegue curvar com esse peso limite, certamente conseguirá suportar essas massas num caso estático.

Todas as cargas a que um automóvel é submetido passarão pelo seu chassi pelo que o seu estudo é de sobremaneira importante e acarreta uma responsabilidade que está internamente ligada a vidas humanas. Os fenómenos de fadiga, assumem também aqui um papel principal e não são por isso menos importantes.

Antagonicamente, e sem comprometer tudo o que foi dito, é esperado, ainda, deste chassi o mínimo peso possível, de forma a reduzir o consumo de combustível, as emissões de poluentes, e a aumentar o desempenho do motor.

6.1 Parâmetros a considerar

Para projetar e conceber um chassi em material compósito é obrigatório ter em consideração que a resposta de uma estrutura deste tipo é diferente da que é dada por um chassi metálico. É, então, necessário conhecer os diferentes modos de rotura que podem acontecer nos materiais compósitos, apontar as causas e compreender as soluções. Isto já foi anteriormente referido, mas é crucial, neste ponto, voltar a falar rapidamente deste aspeto. A rotura em materiais compósitos pode ser de várias ordens (Teixeira, 2014):

- Rotura da matriz do compósito;
- Rotura das fibras;
- Descoesão entre a fibra e a matriz;
- Delaminagem.

Os critérios de rotura que regem os materiais compósitos, são baseados nos critérios utilizados para os materiais isotrópicos, critérios baseados na tensão máxima, e critérios baseados na deformação máxima. Podem ser aplicados os critérios de von Mises e Tresca, para determinar tensões combinadas em diferentes direções, que são utilizados para tensões de cedência, no caso de materiais isotrópicos, mas podem ser utilizados nos compósitos se utilizarmos a tensão de rotura, estes critérios, de modo geral são os mais adotados nos programas de simulação de elementos finitos (Tsai, 2008).

6.1.1 Rigidez torcional

A rigidez torcional é uma das mais importantes características da construção do chassi. Assim, um momento torsor tende a fazer girar uma das extremidades do chassi relativamente à outra, Figura 6.1. Esta rigidez deve ser suficiente para garantir a integridade do chassi, e para que não interfira no bom desempenho do automóvel, isto é, no conforto dos passageiros.

As solicitações que provocam torção podem ser encontradas em diversas situações de funcionamento dos automóveis. Exemplos disso são quando uma roda sobrepõe uma irregularidade no piso, seja ele uma lomba, um buraco, ou até mesmo uma subida de um passeio, enquanto as outras rodas se mantêm na mesma posição vertical, em termos físicos é aplicado um binário ao chassi (Teixeira, 2014).

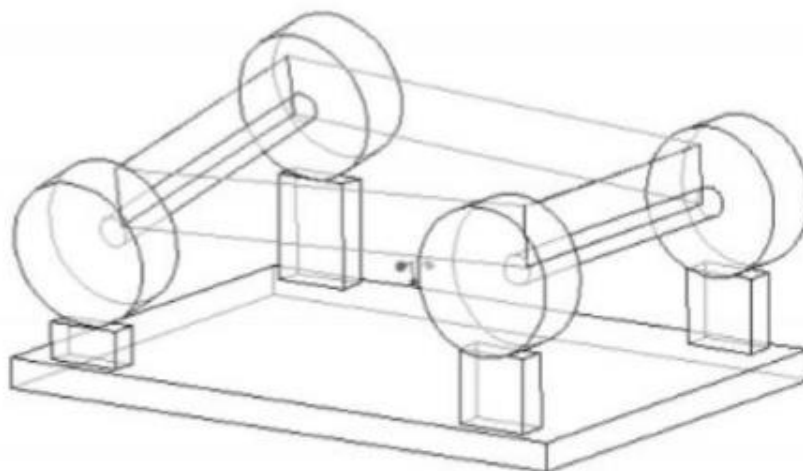


Figura 6.1 - Efeito da torção num chassi (Teixeira, 2014).

Depois de aplicadas estas condições no ABAQUS será possível determinar a rigidez torcional do chassi, com base no esquema da Figura 6.2.

Considerando os resultados obtidos, será possível determinar a rigidez do chassi, recorrendo à formulação apresentada pela equação (14)

$$K_{ch} = \frac{\text{Binário (Nm)}}{\hat{\text{Ângulo de torção}} (^{\circ})} = \frac{FL}{\tan^{-1} \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{2L}} \quad (14)$$

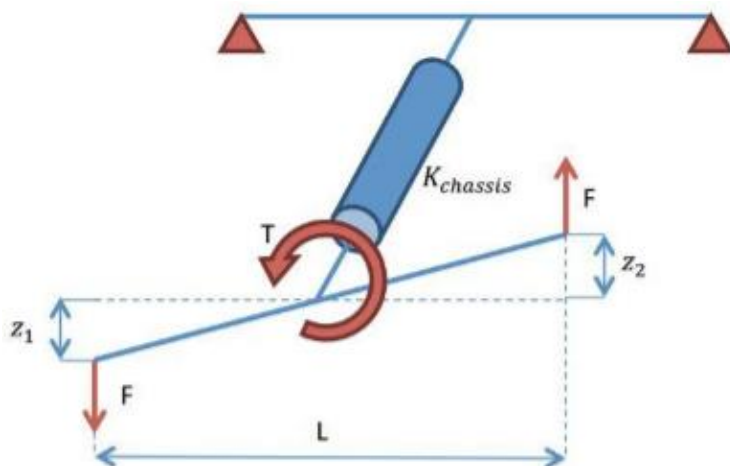


Figura 6.2 - Parâmetros a considerar para o cálculo da rigidez do chassi (Teixeira, 2014).

6.1.2 Flexão

A flexão vertical (Figura 6.3) surge da transferência de carga longitudinal que acontece quando existe uma mudança brusca de velocidade (Teixeira, 2014).

Está provado que um chassi que tenha boa resistência à torção, geralmente, terá também a necessária rigidez à flexão. A torção do chassi pode ser evitada com uma estrutura que confira elevada resistência longe do eixo sobre o qual o chassi tem tendência a torcer, ou seja, nas vigas que ligam as rodas da frente (representadas por apoios duplos) às traseiras (representadas pelo vetor F), na Figura 6.2.

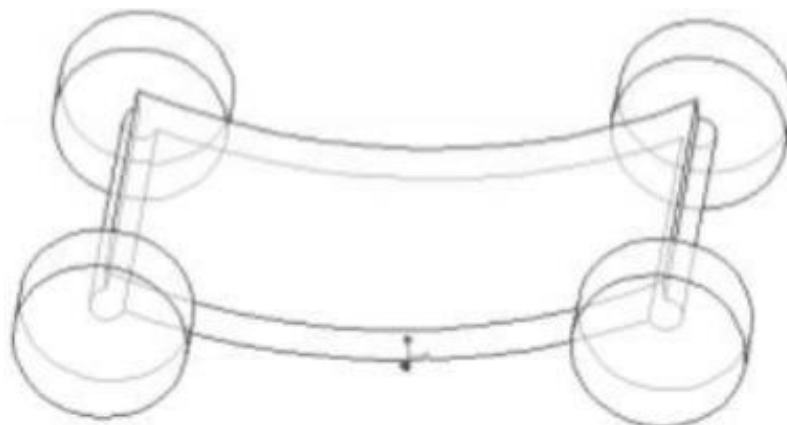


Figura 6.3 - Efeito da flexão num chassi (Teixeira, 2014).

Ocorre, ainda, flexão lateral (Figura 6.4). Esta é, tipicamente, o resultado das forças centrífugas a que um veículo está sujeito em curva. Nessas condições, está a ser um gerado um binário sobre o chassi (Teixeira, 2014).

O deslocamento do centro de gravidade nas curvas pode ser um aspeto a ter em atenção no projeto. É importante verificar que os componentes onde estão as massas suspensas estão localizados à menor cota vertical possível, para diminuir a transferência de carga lateral e diminuir o centro de gravidade do veículo. É essencial que um veículo possua todas as características, para em situações limite, este não capote facilmente.

Atendendo a uma visão mais global do projeto, deve ser considerado determinante a alta resistência à torção (rigidez) que o veículo deve possuir, tendo em conta que os módulos de rigidez dos materiais aplicados (E, G) não são elevados. Apesar disso, as maiores concentrações de tensões, como já seria de esperar, ocorrem na ligação da suspensão ao chassi (esforços concentrados) e nos apoios do motor (que é uma massa concentrada). Isto pode ser verificado se for realizada uma análise aos pontos críticos da estrutura (Teixeira, 2014).

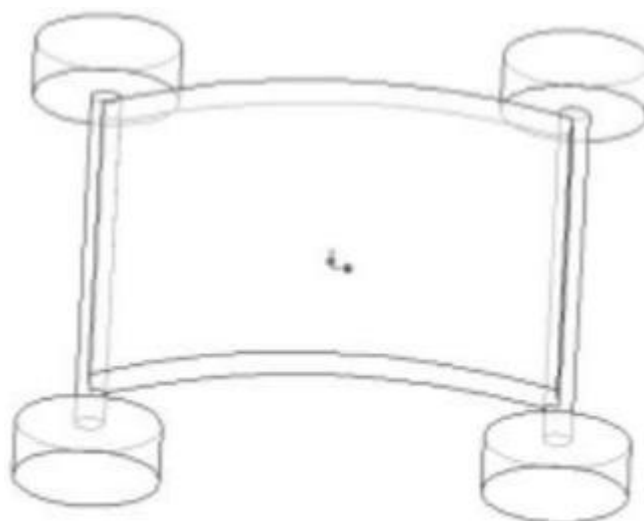


Figura 6.4 - Representação da flexão lateral no chassi (Teixeira, 2014).

6.1.3 Ligações aparafusadas entre os componentes

Estas ligações permitem uma montagem e desmontagem rápida e repetida dos componentes sem os danificar substancialmente; facilmente podem ser realizadas inspeções visuais periódicas para detetar danos ou desgaste dos componentes, e é esperado um bom comportamento quando estas ligações são sujeitas a esforços de tração. No entanto, e como referido no capítulo 5.1.1, os furos interrompem a continuidade das fibras, reduzem, portanto, a sua rigidez, já que introduzem concentração de tensões devido à criação de um furo para efetuar a ligação (Teixeira, 2014). Assim a criação de ligações aparafusadas também irá ser considerada na definição dos pontos críticos da estrutura, em materiais compósitos. A resistência mecânica de uma junta pode ser aumentada quando se consegue reduzir a concentração de tensões, distribuindo os esforços por mais que uma ligação.

6.2 O Modelo

O objetivo do modelo é perceber se as características do design escolhido garantem a rigidez torcional necessária. Procura-se obter, como já referido, um compromisso entre a elevada rigidez e, a diminuição de peso que se prevê com a aplicação dos materiais compósitos. Com o modelo que será proposto pretende-se mostrar que é possível obter um chassi capaz de suportar todas as solicitações que serão impostas em funcionamento, bem como obter uma solução mais leve que a original em aço (Teixeira, 2014).

6.3 Definição dos pontos críticos

É esperado que os pontos críticos do chassi, estejam presentes nas zonas circundantes à ligação do chassi com componentes que transmitem forças exteriores. Como por exemplo a suspensão do veículo e os apoios do motor. Isto irá ser analisado com maior detalhe posteriormente. Esta definição dos pontos críticos é fundamental para que estas zonas sejam tratadas com especial cuidado, caso contrário facilmente se originam fendas e fadiga do material presente nestas zonas (Teixeira, 2014). Cabe ao projetista reforçar estas zonas e tentar distribuir estas cargas que são bastante concentradas, de modo a criarem um efeito substancialmente menos considerável.

7 Design

Para o design do chassi do *Sado 550*, naturalmente teve-se em atenção que o automóvel original foi construído para ser um utilitário citadino, com um pequeno motor e dimensões reduzidas que não lhe permitiam ter um desempenho que exigisse significativamente do seu chassi. No entanto, para projetar o chassi foram utilizadas simulações em elementos finitos, através do *software* ABAQUS, em que se utilizaram solicitações extremamente exigentes (para um pequeno carro, de 500 kg, que poderia atingir os 670 kg (JCLE, 2006)), de forma a tornar o chassi mais duradouro, e também de forma a inserir um coeficiente de segurança uma vez que não foram realizadas simulações com solicitações dinâmicas.






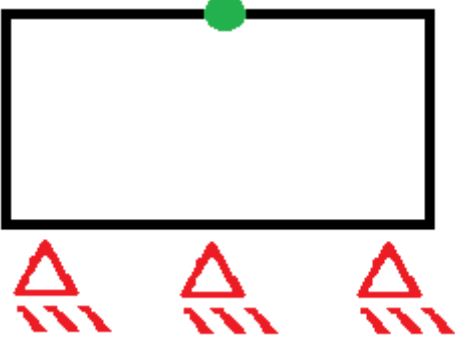
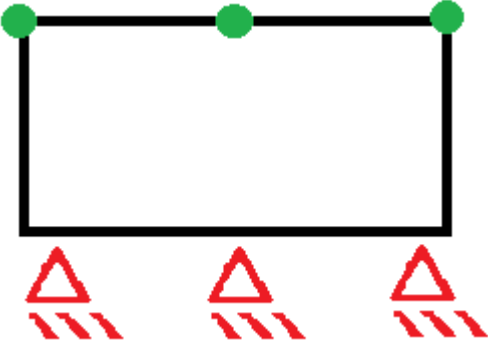

As solicitações utilizadas nas simulações no ABAQUS apresentam, frequentemente, direções verticais, que tentam representar os esforços envolvidos quando uma das rodas do veículo em movimento, sobrepõe um obstáculo. Assim, se o obstáculo for uma elevação no terreno, é esperada uma solicitação no pneu, que transfere imediatamente a carga para a suspensão, e a suspensão transmite para o chassi nos pontos de ligação da suspensão ao chassi, que serão considerados como um só uma vez que estarão restritos a uma pequena região. Deste modo, os principais esforços terão direções verticais (sabendo que a posição do chassi é a horizontal), e sentido ascendente. Refira-se ainda, que no caso de uma depressão no terreno, assim que uma roda desce, entrando na cova, o veículo inclina ligeiramente para esse lado, e a maior solicitação ocorre no momento em que o automóvel em movimento, regressa ao piso regular, tendo que subir abruptamente os limites da cova, se a cova for profunda e com arestas vivas, irá provocar uma forte solicitação vertical de sentido ascendente. Em última análise, se pensarmos no caso de uma subida ou descida de um passeio, por parte do automóvel, verificamos que os esforços impostos ao chassi são sempre verticais de sentido ascendente. Ao descer o passeio, no momento em que a roda está no ar, os esforços são praticamente nulos. No entanto, assim que a roda assenta bruscamente no terreno dá-se uma forte solicitação no sentido descrito acima. No caso de uma subida ao passeio verificamos que aquando do impacto da roda no passeio, para o veículo subir, existe uma forte solicitação com o sentido enunciado acima.

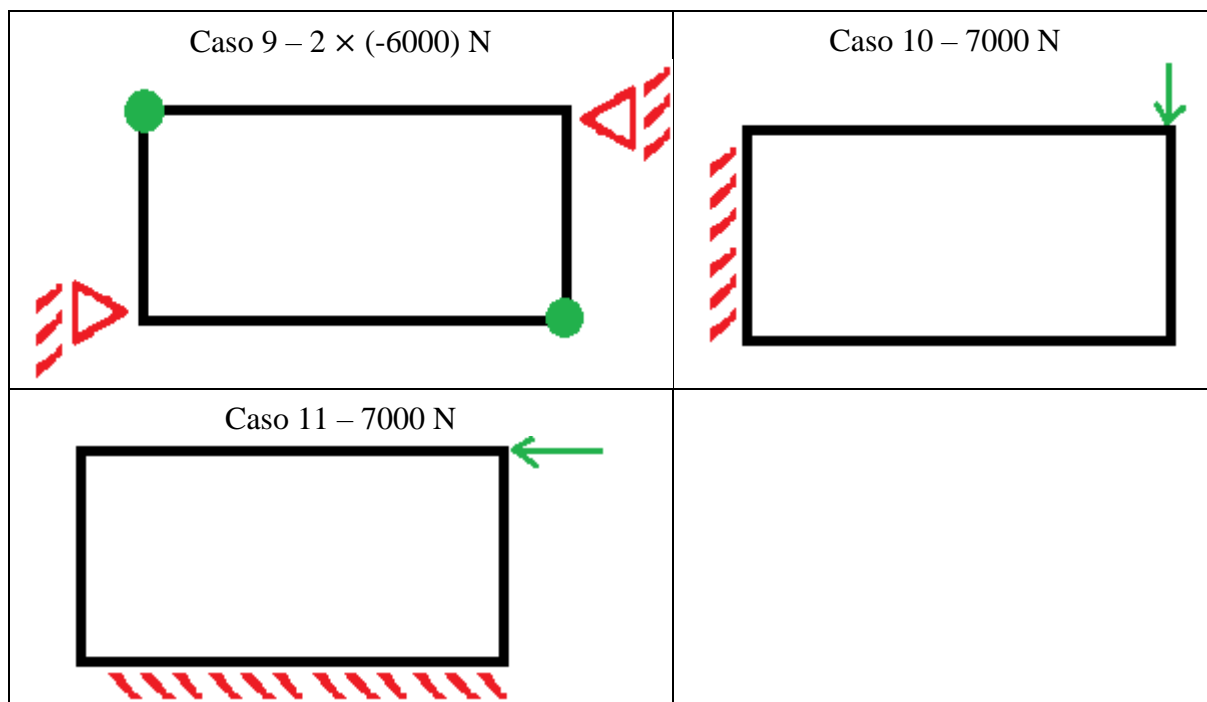
A direção e sentido da força utilizada nas simulações tem uma relevância tremenda se quisermos tirar o máximo partido possível de um design eficiente do chassi (que não seja excessivamente majorado), uma vez que os materiais que irão ser utilizados neste projeto não possuem resistências idênticas à compressão ou à tração (como irá ser visto em seguida), como tal é de bom senso atentar ao sentido das forças nas simulações.

Refiram-se ainda outros aspetos de alguma importância, nomeadamente, a utilização da maior parte dos casos com uma solicitação aplicada apenas numa só roda, isto é, num só ponto do chassi, e não em dois pontos opostos do chassi. Uma solicitação aplicada apenas numa roda, aplica inerentemente torção e flexão ao chassi, enquanto um esforço que esteja distribuído por duas rodas opostas retira uma parte considerável dos efeitos de torção, como tal é esperado que as solicitações em duas rodas opostas sejam menos exigentes que uma solicitação com o dobro do valor em uma só roda.

Outro tipo de solicitação tem a ver com a exigência de um automóvel em curva que aplica flexão lateral ao chassi. Essas situações estão consideradas no caso 10 e 11 que está previsto na Tabela 7.1. Nessa tabela é possível ver os diferentes casos em que de modo esquemático estão representadas as condições fronteiras (a vermelho), bem como as diferentes solicitações aplicadas (a verde). Nos casos de 1 a 9 os pontos a verde representam os locais onde atuam as solicitações, que têm uma direção perpendicular ao plano do chassi representado por um retângulo. No caso 9 as duas solicitações têm o sentido do solo, enquanto os casos 1 a 8 apresentam o sentido oposto.

Tabela 7.1 - Representação esquemática das diversas condições fronteiras, bem como dos esforços aplicados.

<p>Caso 1 – 8000 N</p> 	<p>Caso 2 – 8000 N</p> 
<p>Caso 3 – 8000 N</p> 	<p>Caso 4 – 8000 N</p> 
<p>Caso 5 – 8000 N</p> 	<p>Caso 6 – 8000 N</p> 
<p>Caso 7 – 3 × 3000 N</p> 	<p>Caso 8 – 3 × 3000 N</p> 



PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS MODELOS DO TIPO 1

Os modelos do tipo 1, que irão ser introduzidos no subcapítulo 7.1, usarão painéis sanduíche com dois materiais distintos, Figura 7.1.

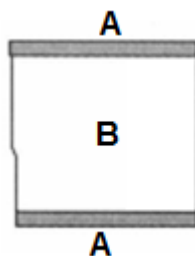


Figura 7.1 – Esquema dos painéis de sanduíche a utilizar no chassi.

O material representado por A, na Figura 7.1, é fibra de vidro com matriz em poliéster insaturado, que tem a função de aguentar os principais esforços, é habitualmente designado por pele ou placa do painel sanduíche. O material representado por B, tem a função de afastar o material A de modo a criar um maior momento de inércia, quanto mais afastados estiverem as placas A melhores propriedades mecânicas serão esperadas do painel. No entanto, a espessura B tem que tomar um valor ponderado, de modo a que seja exequível. O material utilizado no núcleo, B, é o poliuretano. As propriedades do compósito de fibra de vidro foram determinadas com base em cálculos por Moura *et al* (2011) e graficamente por Tsai (2008), Figura 3.17. As propriedades do poliuretano (PU) foram retiradas do *software* ESAComp 4.5.2. Outras propriedades, que diferem consoante o modelo, como a orientação das camadas da fibra de vidro, estão presentes junto de cada modelo.

Tabela 7.2 - Propriedades dos materiais utilizados nos modelos do tipo 1.

Fibra de Vidro (A)		Poliuretano (B)	
E₁	42.600 MPa	E	14,5 MPa
E₂	9.780 MPa		
v₁₂	0,28	v	0,45
G₁₂	3.380 MPa		
G₁₃	3.300 MPa		
G₂₃	3.300 MPa		
Volume de Fibra	55%		
ρ	2.000 kg/m ³	ρ	60 kg/m ³

As tensões limite do compósito de fibra de vidro serão obrigatoriamente respeitadas, quanto ao Poliuretano sabe-se que a sua elongação na rotura é superior à elongação verificada para o compósito de fibra de vidro, como tal quando a fibra de vidro atingir a rotura, o poliuretano ainda está em fase de elongação, trata-se da situação relatada pela Figura 3.5. Assim, as tensões que nunca podem ser ultrapassadas, para os modelos de tipo 1 estão representadas na Tabela 7.3. Estes valores são ponderados de mais que uma fonte (Moura *et al*, 2011; Tsai, 2008) de forma a atribuir limites o mais próximo da verdade possível.

Tabela 7.3 - Tensões limite segundo as diferentes direções para a Fibra de Vidro utilizada nos modelos de tipo 1.

Tensões Limite	
Tensão normal (tração) segundo a direção 11 (S₁₁ +)	1062
Tensão normal (compressão) segundo a direção 11 (S₁₁ -)	-610
Tensão normal (tração) segundo a direção 22 (S₂₂ +)	31
Tensão normal (compressão) segundo a direção 22 (S₂₂ -)	-118
Tensão de corte (positiva) (S₁₂)	72
Tensão de corte (negativa) (S₁₂)	-72

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS NOS MODELOS DO TIPO 2






Os modelos do tipo 2 serão introduzidos no subcapítulo 7.2. A Fiberline é uma empresa que se dedica à pultrusão de perfis. Desta forma, é uma alternativa a considerar uma vez que são perfis rigorosamente controlados, e que retiram imenso trabalho na aplicação da solução. Uma vez que os perfis já estão prontos, resta então ligá-los de forma conveniente para se obter o chassi pretendido. Recorrendo ao site da empresa, (Fiberline, s.d.) foi possível utilizar as propriedades garantidas pela empresa, no ABAQUS, de modo a proceder às devidas simulações. As propriedades utilizadas nos modelos de tipo 2 foram então, Tabela 7.4:

Tabela 7.4 - Propriedades dos materiais utilizados nos modelos do tipo 2.

Fibra de Vidro (Fiberline)	
E₁	28.000 MPa
E₂	8.500 MPa
v₁₂	0,23
G₁₂	3.000 MPa
G₁₃	3.000 MPa
G₂₃	3.000 MPa
ρ	1.800 kg/m ³

E os limites últimos de tensão, segundo diferentes direções, para o compósito de fibra de vidro da Fiberline, Tabela 7.5:

Tabela 7.5 - Valores limite de tensão do material utilizado nos modelos de tipo 2 (Fiberline, s.d.).

Typical strength values (dry condition)		
		[MPa]
Flexural strength, 0°	f _{b,0°}	240
Flexural strength, 90°	f _{b,90°}	100
Tensile strength, 0°	f _{t,0°}	 240
Tensile strength, 90°	f _{t,90°}	 50
Compressive strength, 0°	f _{c,0°}	 240
Compressive strength, 90°	f _{c,90°}	 70
Shear strength	f _τ	 25
Pin-bearing strength, longitudinal direction	f _{cB,0°}	150
Pin-bearing strength, transverse direction	f _{cB,90°}	70

7.1 Modelos do tipo 1

Apresentadas as propriedades dos materiais utilizados na simulação dos modelos, interessa agora conhecer com detalhe o design utilizado nas diferentes simulações, bem como a evolução que os modelos tiveram de forma a ir de encontro aos resultados pretendidos. O *Sado 550* tinha 2.365 mm de comprimento e 1.345 mm de largura, o chassi então terá que ter dimensões ligeiramente inferiores uma vez que determinadas peças e curvaturas excedem as dimensões do chassi, como por exemplo os para-choques. Assim, o chassi foi concebido com um comprimento de 2.100 mm e largura de 1.120 mm.

MODELO 1

Como foi referido os modelos do tipo 1 são constituídos por um chassi em painel sanduíche, Figura 7.1. Foram utilizados perfis em “I” de dimensão 120x80x15 mm. O painel sanduíche apresenta dimensões de 3x9x3 mm, em que numa fase inicial a orientação das fibras não é considerada (orientação 0°, compósito unidirecional). O modelo 1 está ilustrado na Figura 7.2.

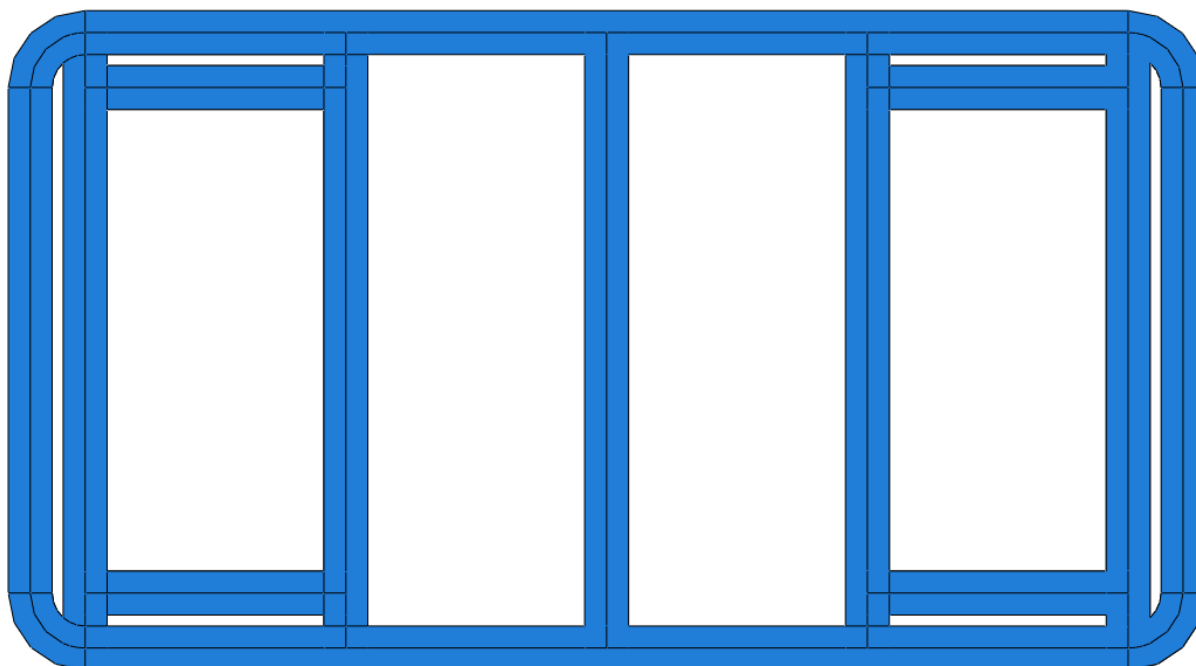


Figura 7.2 - Modelo 1 (vista de cima).

MODELO 1A

O modelo 1A é igual ao modelo 1. Contudo, acrescenta quatro pequenas barras, uma em cada canto, de modo a conferir maior rigidez, esta melhoria acrescenta menos de 1 kg de massa à estrutura e, reduz imenso as tensões na direção 22 e 12 (corte). O modelo 1A pode ser observado na Figura 7.3.

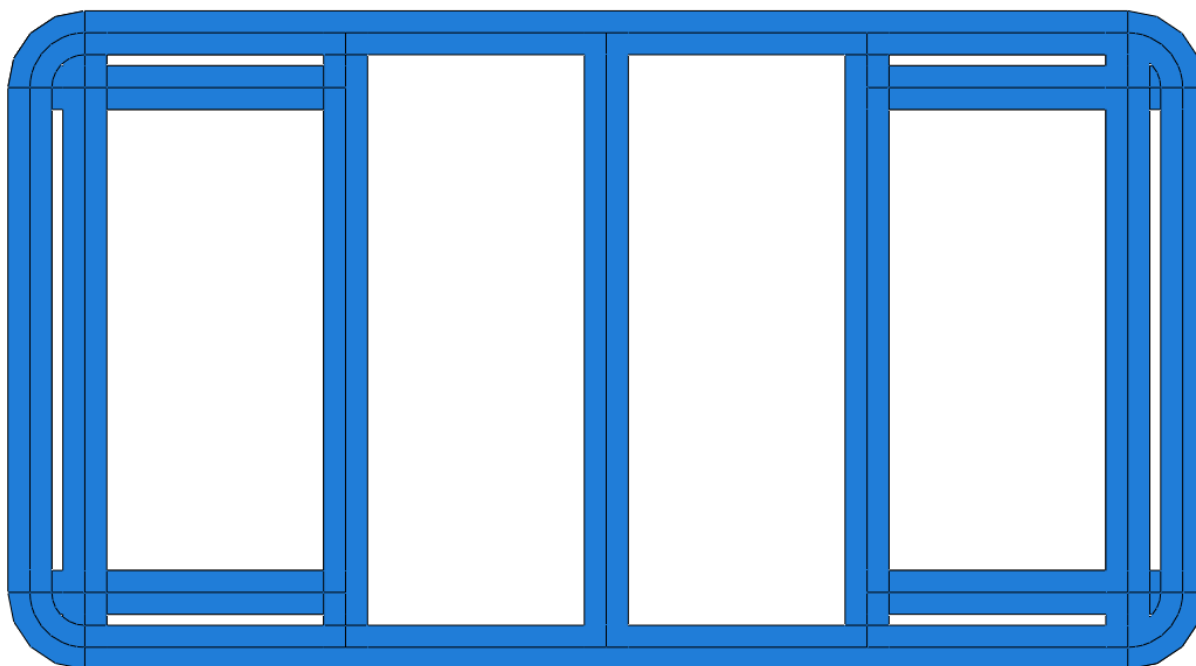


Figura 7.3 - Modelo 1A.

MODELO 1B

O modelo 1B é aparentemente igual ao modelo 1A, no entanto, é utilizado um painel sanduíche de 4x12x4 (20 mm de espessura), sendo que esta alteração aumentou cerca de 16 kg de massa relativamente ao modelo anterior, no entanto, esta alteração oferece mais garantias.

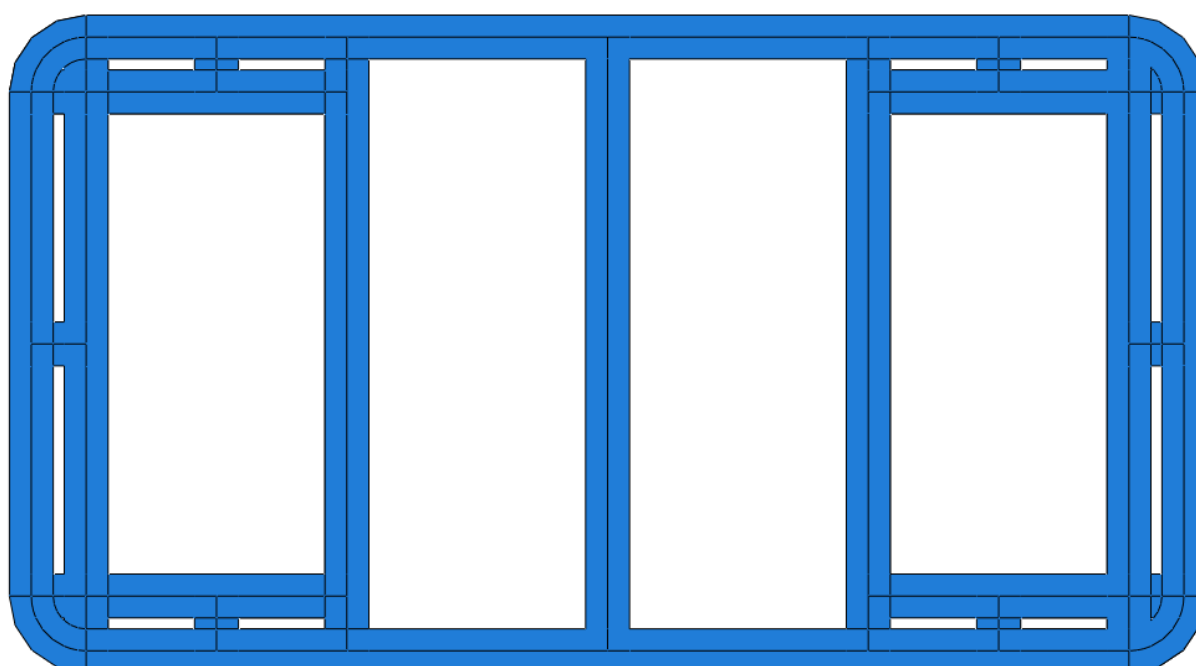
MODELO 1C

Figura 7.4 - Modelo 1C.

O modelo 1C (Figura 7.4), relativamente ao modelo 1B, apresenta seis pequenas barras de modo a reforçar zonas menos resistentes. Estas alterações aumentaram somente cerca de 1,5 kg (estando neste momento o modelo 1C com cerca de 65 kg).

MODELO 1D

O modelo 1D (Figura 7.5), reforça a zona central do chassi, que tinha somente uma barra horizontal, em cada extremo, que era insuficiente para suportar os esforços de torção mais exigentes. O modelo 1D possui uma massa de aproximadamente 74 kg. Este modelo apresenta resultados razoáveis e como tal os modelos subsequentes serão baseados neste, alterando somente a orientação da fibra de vidro (elemento A do painel sanduíche, Figura 7.1).

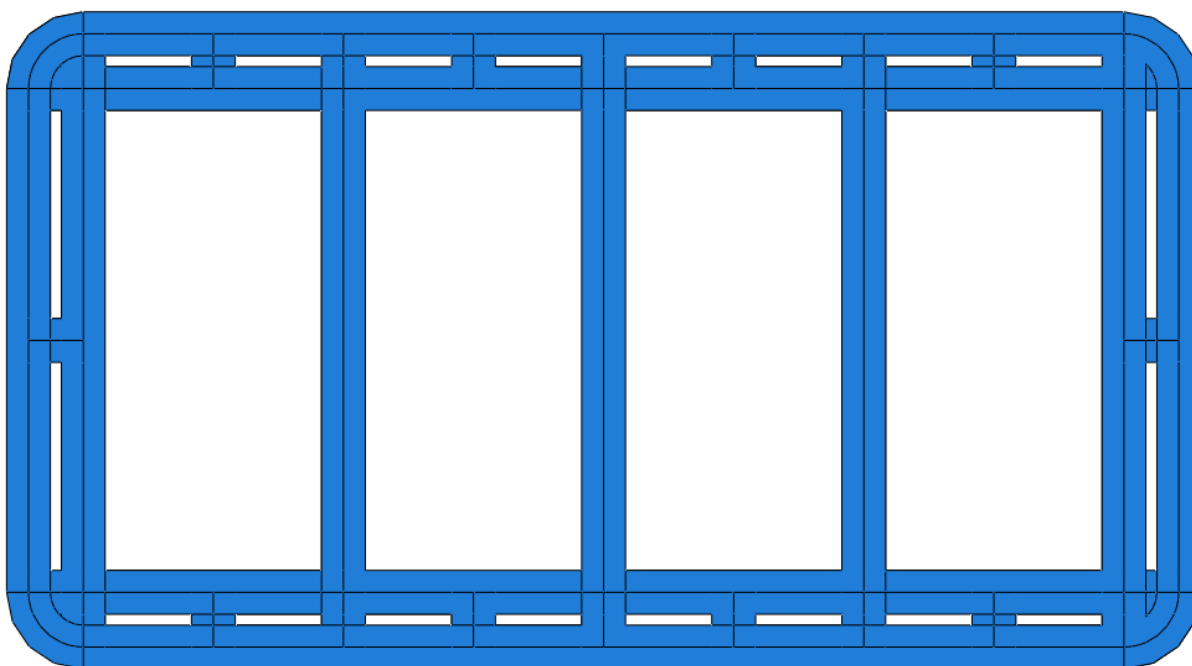


Figura 7.5 - Modelo 1D.

7.2 Modelos do tipo 2

Os modelos do tipo 2, são os modelos que utilizam os perfis pultrudidos Fiberline. Utilizei o desenho base do modelo 1D.

MODELO 2

Para este primeiro modelo do tipo 2, escolhi um dos perfis em “I” tabelados, com dimensões 160x80x8 mm. O chassi resultante tem uma massa de 73,63 kg.

MODELO 2A

O modelo 2A (Figura 7.6) é visualmente idêntico, no entanto, a sua dimensão é já um pouco excessiva (perfil em “I” 200x100x10 mm), para aplicar num automóvel de tão reduzido tamanho, não justificava continuar a aumentar o tamanho do perfil para procurar tensões seguras para esta aplicação e, por isso, este é o último modelo do tipo 2 e possui 92,87 kg.

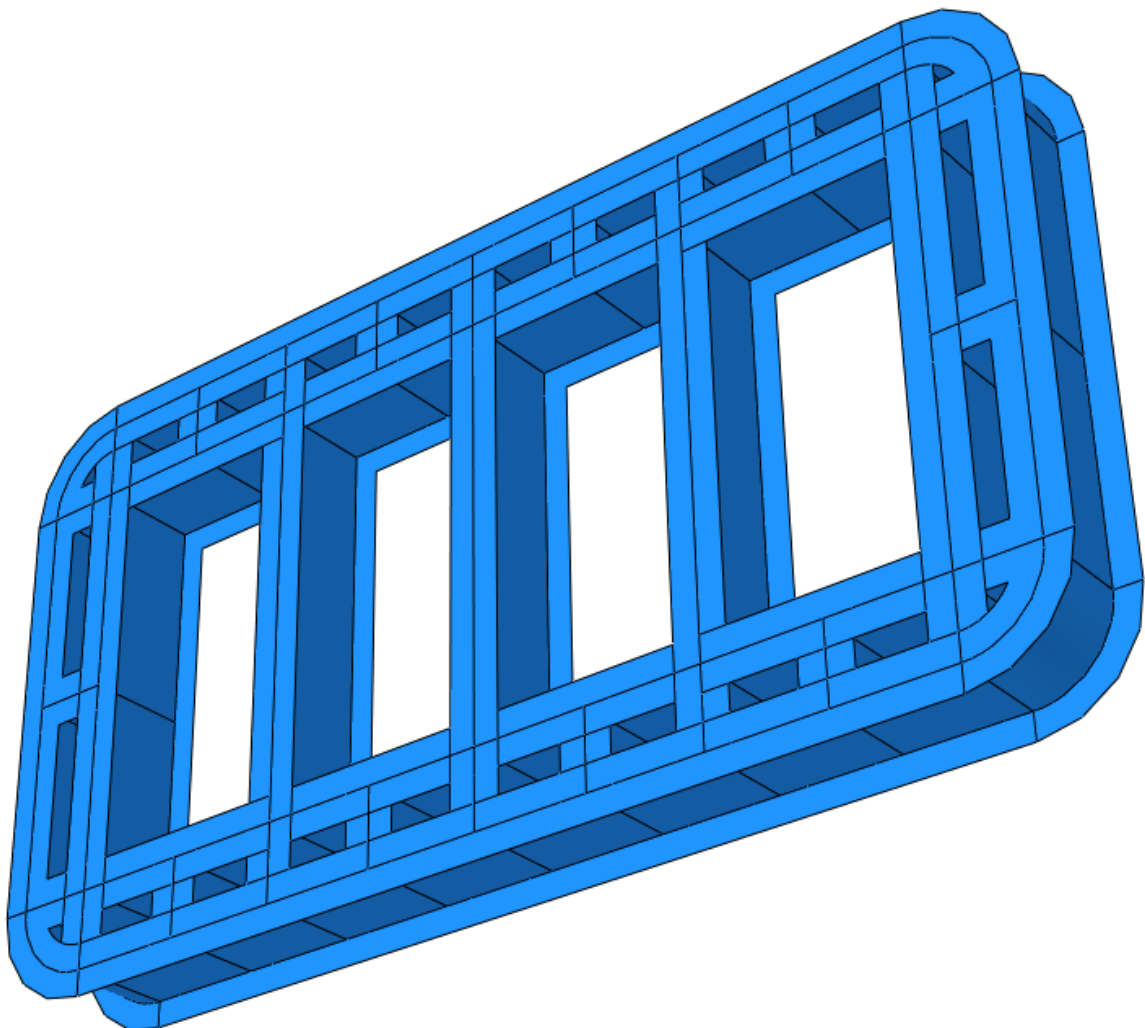


Figura 7.6 - Modelo 2A.

8 Resultados

Para a obtenção dos resultados começou-se sempre por verificar se as tensões para o caso 1 cumpriam para todas as direções, e só no caso de cumprirem (com uma margem aceitável, idealmente não ultrapassar os 55% da tensão máxima), é que se fez o teste para os casos seguintes.

Os fatores que mais influenciaram os valores onde as tensões eram máximas, foram: 1) o tamanho de cada elemento utilizado, isto é, a qualidade do refinamento da malha utilizada; 2) a concentração de tensões muitas vezes existente em pontos onde haviam vértices (ângulos retos); 3) na transição da condição fronteira para a restante estrutura (onde o deslocamento e tensões são nulos) e imediatamente ao lado aparecem diversas vezes tensões de valor máximo. Posto isto, podemos concluir que estes valores por si só, já possuem um coeficiente de segurança inerente, uma vez que, no ABAQUS tem que existir uma condição fronteira bem definida, situação que na prática num chassi não existe, desse modo, a concentração de tensões tão saliente como se encontrou no ABAQUS e que majorou os resultados, não está presente de forma tão vincada.

Em cada tabela de resultados temos no cabeçalho (da esquerda para a direita), a cor-de-rosa, a dimensão do elemento utilizado (quanto menor a dimensão de cada elemento mais refinada é a malha e mais preciso é o resultado), a massa (kg) do modelo do chassi em causa e ainda a dimensão do painel sanduíche utilizado (modelos do tipo 1) ou a dimensão do perfil (modelos do tipo 2). É ainda apresentado a cor-de-rosa, abaixo, o deslocamento vertical (U3) em mm, imposto pelas forças verticais aplicadas a cada chassi. É mostrado se a tensão obtida é através de funções de forma lineares ou quadráticas, as últimas aproximam-se do resultado real mais rapidamente, no entanto as simulações são consideravelmente mais lentas. As tensões apresentadas encontram-se em MPa e a escala de cores permite mais rapidamente compreender se nos estamos a aproximar de resultados com tensões impostas relativamente baixas ou não.

Os restantes resultados são apresentados no ANEXO D de modo a não tornar este capítulo demasiado extenso e com demasiados resultados pouco relevantes.

8.1 Modelos do tipo 1

Os modelos de 1D a 1DH são iguais, somente a orientação das fibras é alterada, e em qualquer exemplo é simétrica relativamente ao plano do núcleo em poliuretano do painel sanduíche. As orientações para cada modelo estão apresentadas na Tabela 8.1.

Tabela 8.1 - Orientação das fibras consoante o modelo.

Modelo	Orientação	Espessura de cada camada [mm]
1DA	0,90,90,0	1-1-1-1-12-1-1-1-1
1DB	0,45,90,45,0	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...
1DC	0,-45,90,-45,0	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...
1DD	90,45,0,45,90	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...
1DE	0,90,45,90,0	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...
1DF	0,90,90,90,0	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...
1DG	0,45,90,-45,0	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...
1DH	0,-45,90,45,0	0,8-0,8-0,8-0,8-0,8-12-0,8...

MODELO 1

Tabela 8.2 - Resultados para o Modelo 1.

MODELO 1						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	46,88	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	140	Limite	
S11+	689,00	344,90	mm		1062	<25%
S11-	-741,20	-380,35			-610	<35%
S22+	148,20	195,39			31	<45%
S22-	-148,20	-123,17			-118	<55%
S12+	146,50	95,06			72	>55%
S12-	-126,10	-70,66			-72	

MODELO 1A

Tabela 8.3 - Resultados para o Modelo 1A.

MODELO 1A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	47,62	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	55,35	Limite	
S11+	319,10	279,40	mm		1062	<25%
S11-	-319,30	-324,40			-610	<35%
S22+	31,65	43,31			31	<45%
S22-	-31,65	-42,34			-118	<55%
S12+	34,27	39,34			72	>55%
S12-	-34,76	-22,03			-72	

MODELO 1B

Tabela 8.4 - Resultados para o Modelo 1B.

MODELO 1B						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	63,5	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	40,49	Limite	
S11+	228,10	212,91	mm		1062	<25%
S11-	-228,20	-247,70			-610	<35%
S22+	23,58	32,35			31	<45%
S22-	-23,59	-27,19			-118	<55%
S12+	23,35	34,46			72	>55%
S12-	-24,94	-16,08			-72	

MODELO 1C

Tabela 8.5 - Resultados para o Modelo 1C.

MODELO 1C						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	65,02	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	37,12	Limite	
S11+	133,40	191,78	mm		1062	<25%
S11-	-184,10	-212,41			-610	<35%
S22+	20,72	26,47			31	<45%
S22-	-26,45	-24,09			-118	<55%
S12+	27,80	31,83			72	>55%
S12-	-25,14	-23,41			-72	

MODELO 1D

Tabela 8.6 - Resultados para o Modelo 1D.

MODELO 1D						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	26,30	Limite	
S11+	127,5	140,92	mm		1062	<25%
S11-	178,90	-207,04			-610	<35%
S22+	20,10	20,28			31	<45%
S22-	-25,37	-23,14			-118	<55%
S12+	27,18	28,60			72	>55%
S12-	-24,42	-22,78			-72	

MODELO 1DA

Tabela 8.7 – Resultados para o Modelo 1DA.

MODELO 1DA						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				Orientação
Tensões			$U3=$	31,70	Límite	Camadas
S11+	136,7	165,12	mm		1062	
S11-	-201,10	-257,42			-610	0
S22+	16,99	16,27			31	90
S22-	-20,16	-18,72			-118	90
S12+	21,38	25,71			72	0
S12-	-25,91	-23,63			-72	

MODELO 1DB

Tabela 8.8 – Resultados para o Modelo 1DB.

MODELO 1DB						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				Orientação
Tensões			$U3=$	31,59	Límite	Camadas
S11+	138,8	170,25	mm		1062	
S11-	-202,10	-262,27			-610	0
S22+	15,52	14,21			31	45
S22-	-21,51	-23,74			-118	90
S12+	16,27	19,31			72	45
S12-	-15,54	-21,59			-72	0

MODELO 1DC

Tabela 8.9 – Resultados para o Modelo 1DC.

MODELO 1DC						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				Orientação
Tensões			$U3=$	31,88	Límite	Camadas
S11+	135,6	168,96	mm		1062	
S11-	-191,80	-259,35			-610	0
S22+	17,60	16,19			31	-45
S22-	-19,79	-21,16			-118	90
S12+	18,39	22,13			72	-45
S12-	-21,41	-17,15			-72	0

MODELO 1DD

Tabela 8.10 - Resultados para o Modelo 1DD comparativamente com 1DB.

MODELO 1DD						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões		Comparação com 1DB			Limite	Camadas
S11+	69,37		138,80		1062	
S11-	-93,37		-202,10		-610	90
S22+	34,07		15,52		31	45
S22-	-48,49		-21,51		-118	0
S12+	16,02		16,27		72	45
S12-	-16,66		-15,54		-72	90

MODELO 1DE

Tabela 8.11 - Resultados para o Modelo 1DE comparativamente com 1DB.

MODELO 1DE						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões		Comparação com 1DB			Limite	Camadas
S11+	139,90		138,80		1062	
S11-	-205,90		-202,10		-610	0
S22+	17,74		15,52		31	90
S22-	-20,31		-21,51		-118	45
S12+	18,55		16,27		72	90
S12-	-17,20		-15,54		-72	0

MODELO 1DF

Tabela 8.12 - Resultados para o Modelo 1DD comparativamente com 1DB.

MODELO 1DF						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões		Comparação com 1DB			Limite	Camadas
S11+	143,10		138,80		1062	
S11-	-211,50		-202,10		-610	0
S22+	16,53		15,52		31	90
S22-	-19,43		-21,51		-118	90
S12+	21,71		16,27		72	90
S12-	-26,25		-15,54		-72	0

MODELO 1DG

Tabela 8.13 - Resultados para o Modelo 1DG comparativamente com 1DB.

MODELO 1DG						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões		Comparação com 1DB			Limite	Camadas
S11+	136,60		138,80		1062	
S11-	-195,80		-202,10		-610	0
S22+	18,37		15,52		31	45
S22-	-20,51		-21,51		-118	90
S12+	17,02		16,27		72	-45
S12-	-15,45		-15,54		-72	0

MODELO 1DH

Tabela 8.14 - Resultados para o Modelo 1DH comparativamente com 1DB.

MODELO 1DH						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões		Comparação com 1DB			Limite	Camadas
S11+	136,90		138,80		1062	
S11-	-195,80		-202,10		-610	0
S22+	18,41		15,52		31	-45
S22-	-20,44		-21,51		-118	90
S12+	17,18		16,27		72	45
S12-	-15,19		-15,54		-72	0

Rigidez do Modelo 1DB (eq. (14), capítulo 6.1.1)

$$K_{ch} = \frac{FL}{\tan^{-1} \frac{\Delta z_1 + \Delta z_2}{2L}} = \frac{500 \times 1,2}{\tan^{-1} \frac{(1,364 + 1,373) \times 10^{-3}}{2 \times 1,2}} = 9182,6 \text{ Nm/}^\circ$$

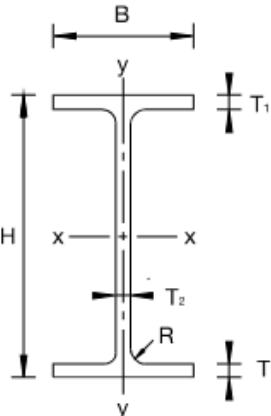
Rigidez do Modelo 1C

$$K_{ch} = \frac{500 \times 1,2}{\tan^{-1} \frac{(1,818 + 1,818) \times 10^{-3}}{2 \times 1,2}} = 6912,2 \text{ Nm/}^\circ$$

8.2 Modelos do tipo 2

Os modelos do tipo 2 foram desenhados com base nos perfis em “I” pultrudidos pela Fiberline. Como tal foram utilizadas as tabelas da empresa para levantamento das suas características e geometrias, Tabela 8.15. Saliente-se que os limites para as tensões máximas são agora diferentes para os modelos do tipo 2.

Tabela 8.15 - Perfis em I Fiberline.



I-profile HxBxT ¹⁾	H mm	B mm	T ₁ mm	T ₂ mm	R mm	A mm ²	A _{k,y} mm ²	A _{k,x} mm ²	g kg/m	I _{xx} mm ⁴	W _{xx} mm ³	I _{yy} mm ⁴	W _{yy} mm ³
factor	1	1	1	1	1	10 ³	10 ³	10 ³	1	10 ⁶	10 ³	10 ⁶	10 ³
I 120x60x6	120	60	6	6	7.5	1.42	0.68	0.58	2.55	3.10	51.7	0.22	7.30
I 160x80x8	160	80	8	8	8	2.49	1.22	1.02	4.48	9.66	121	0.69	17.3
I 200x100x10	200	100	10	10	10	3.89	1.90	1.60	6.99	23.6	236	1.69	33.7
I 240x120x12	240	120	12	12	12	5.60	2.74	2.30	10.1	48.9	408	3.50	58.3
I 300x150x15	300	150	15	15	15	8.74	4.28	3.60	15.7	119	796	8.54	114
I 360x180x18	360	180	18	18	18	12.6	6.16	5.18	22.7	248	1376	17.7	197

MODELO 2

Tabela 8.16 - Resultados para o Modelo 2.

MODELO 2						
Caso 1	Dim.EF	10	Massa	73,63	Dimensões	I - 160*80*8
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			U3=	42,96	Limite	
S11+	200,70	207,17	mm		240	<25%
S11-	-199,40	-164,91			-240	<35%
S22+	33,21	38,81			50	<45%
S22-	-34,09	-53,46			-70	<55%
S12+	43,94	55,63			25	>55%
S12-	-38,49	-48,05			-25	

MODELO 2A

Tabela 8.17 - Resultados para o Modelo 2A.

MODELO 2A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	92,87	<i>Dimensões</i>	I-200*100*10
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	21,45	Limite	
S11+	122,90	126,55	mm		240	<25%
S11-	-122,10	-101,48			-240	<35%
S22+	19,95	25,10			50	<45%
S22-	-19,87	-23,86			-70	<55%
S12+	19,03	35,71			25	>55%
S12-	-25,26	-31,19			-25	

8.3 Análise dos Resultados

A análise dos resultados fica grandemente facilitada pela escala de cores utilizada. Assim, e de forma simples, é possível afirmar que os modelos que possuam valores na zona do branco ou do verde, nos resultados serão os que mais garantias fornecem sob o ponto de vista estrutural. Pretende-se também evitar a cor vermelha, que representa valores de tensão superiores a 55% da tensão limite em determinada direção. No ANEXO D estão presentes os restantes resultados obtidos.

Os resultados apresentados para os modelos do tipo 2 utilizaram somente elementos finitos de dimensão 10 uma vez que mesmo que se refinasse mais a malha continuaria a não cumprir os limites impostos para as solicitações de corte (S12), sendo o limite de 25 MPa, a tensão de corte (S12+) do Modelo 2A situa-se claramente acima deste valor (35,71 MPa), e a massa deste chassi é bastante superior aos modelos do tipo 1 (92,87 kg face aos 74,08 kg dos modelos da família 1D).

Relativamente aos modelos do tipo 1 desde o Modelo 1 até ao Modelo 1C apresentam vários valores acima do pretendido. Os modelos posteriores a 1C representam uma tentativa de melhorar o Modelo 1D, visto que este já apresentou resultados minimamente aceitáveis. Assim a escolha de diferentes orientações das fibras para o Modelo 1D prende-se com a otimização do resultado, isto é, para a mesma massa, orientar as fibras de modo a conseguir as maiores garantias estruturais possíveis.

Por comparação direta, Tabela 8.18, verifica-se que o Modelo 1DB é o que tem menos “cor”, uma vez que se confrontarmos os resultados obtidos, através da utilização de elementos finitos com funções de forma lineares, constatamos que os resultados para o Modelo 1DB apresentam somente uma cor verde e uma castanha, enquanto modelos como 1DG e 1DH apresentam uma verde e uma vermelha, como tal são piores.

A utilização nesta fase de elementos finitos regidos por funções de forma lineares prende-se somente com a velocidade de simulação, que é consideravelmente mais rápida quando são utilizados estes elementos em vez dos quadráticos. Nesta fase inicial de análise de resultados pretende-se somente verificar qual a tendência dos valores, e não de procurar o resultado mais preciso neste momento. No ponto seguinte é escolhido o Modelo 1DB como aquele com os melhores resultados, resta verificar se ele cumpre os requisitos para os diferentes onze casos de solicitação/condições fronteira, Tabela 7.1.

Tabela 8.18 - Comparação lado a lado dos resultados dos diferentes modelos.

	S11+	S11-	S22+	S22-	S12+	S12-	Tensões
MODELO	1062	-610	31	-118	72	-72	Limite
1	689,00	-741,20	148,20	-148,20	146,50	-126,10	Dim.EF 5
1A	319,10	-319,30	31,65	-31,65	34,27	-34,76	
1B	228,10	-228,20	23,58	-23,59	23,35	-24,94	
1C	133,40	-184,10	20,72	-26,45	27,80	-25,14	
1D	127,5	178,90	20,10	-25,37	27,18	-24,42	Tipo EF Linear
1DA	136,7	-201,10	16,99	-20,16	21,38	-25,91	
1DB	138,8	-202,10	15,52	-21,51	16,27	-15,54	
1DC	135,6	-191,80	17,60	-19,79	18,39	-21,41	
1DD	69,37	-93,37	34,07	-48,49	16,02	-16,66	
1DE	139,90	-205,90	17,74	-20,31	18,55	-17,20	
1DF	143,10	-211,50	16,53	-19,43	21,71	-26,25	
1DG	136,60	-195,80	18,37	-20,51	17,02	-15,45	
1DH	136,90	-195,80	18,41	-20,44	17,18	-15,19	

8.4 Resultados do modelo escolhido

O modelo escolhido foi o 1DB. Nesta fase do projeto procedeu-se à validação dos onze diferentes casos de solicitações/condições fronteira (recorde-se a Tabela 7.1).

Na Tabela 8.19 verifica-se que os limites para as tensões máximas são todos verificados para os onze casos, no entanto, existem dois valores de tensões (S22+) que ultrapassam os 55% da tensão limite numa dada direção, no entanto esta situação não é alarmante uma vez que, como já foi dito, estão a ser utilizadas solicitações que excedem o que irá acontecer em serviço, o que introduz um coeficiente de segurança ao projetista. Por outro lado, estas tensões elevadas surgem na transição da condição fronteira (onde os deslocamentos e rotações são nulos, encastramento) para a restante estrutura, e esta situação não se verifica na realidade uma vez que esta concentração de tensões acaba por ser consideravelmente inferior já que a condição fronteira será progressiva, isto é, o chassi irá rodar por todo suavemente o que aliviará as tensões nesses pontos. Esta situação será ilustrada pela Figura 8.1.

Tabela 8.19 - Resultados do Modelo 1DB para os diferentes casos, com elementos de tamanho 7.

Modelo 1DB												
	Dim.EF	7	Tipo EF	Quadrático	Massa	74,08	Dim.	4'12'4				
Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Tensões												Limite
S11+	156,90	156,04	147,20	64,37	68,91	61,62	30,61	165,50	39,34	102,30	45,93	1062
S11-	-239,18	-265,87	-224,70	-77,23	-71,20	-21,64	-31,79	-209,35	-64,28	-112,10	-45,95	-610
S22+	14,95	16,34	13,29	21,61	18,33	14,76	12,01	14,47	11,66	15,05	7,80	31
S22-	-20,49	-22,31	-20,65	-19,21	-21,88	-8,15	-11,44	-23,24	-16,05	-15,41	-8,90	-118
S12+	17,64	18,84	15,72	20,51	16,62	9,39	4,29	17,68	8,54	9,78	7,46	72
S12-	-18,77	-13,43	-19,23	-11,26	-14,32	-8,89	-3,77	-21,64	-8,26	-9,38	-6,51	-72

A Tabela 8.20 pretende somente refinar a malha para mostrar resultados ainda mais precisos, no entanto, o refinar da malha tende somente a evidenciar as concentrações de tensão principalmente na transição da condição fronteira para a restante estrutura, sendo que as tensões envolvidas na restante estrutura estão largamente salvaguardadas.

Tabela 8.20 - Resultados do Modelo 1DB para os diferentes casos, com elementos de tamanho 5.

Modelo 1DB												
	Dim.EF	5	Tipo EF	Quadrático	Massa	74,08	Dim.	4*12*4				
Casos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Tensões												Limite
S11+	170,25	163,32	170,20	80,57	80,57	82,53	32,13	191,40	40,94	111,20	52,91	1062
S11-	-262,27	-279,81	-250,10	-87,44	-74,21	-22,68	-33,23	-281,30	-85,55	-129,90	-61,13	-610
S22+	14,21	15,90	13,37	23,77	19,86	19,70	13,21	16,53	13,51	16,99	9,25	31
S22-	-23,74	-25,71	-23,21	-22,71	-18,88	-8,95	-12,51	-26,11	-18,81	-17,12	-9,91	-118
S12+	19,31	25,88	18,01	23,80	19,06	12,89	5,03	20,26	11,89	11,89	9,86	72
S12-	-21,59	-20,39	-22,72	-13,16	-16,67	-12,37	-5,07	-25,56	-11,08	-10,73	-8,62	-72

A rigidez torcional para o chassi foi definida no capítulo 6.1.1,

$$K_{ch} = \frac{500 \times 1,2}{\tan^{-1} \frac{(1,364 + 1,373) \times 10^{-3}}{2 \times 1,2}} = 9182,6 \text{ Nm/}^\circ$$

8.5 Concentração de tensões

Na Figura 8.1 facilmente se vê a concentração de tensões existente no chassi do modelo 1DB. No entanto, trata-se de uma situação que estará presente com maior efeito nesta simulação com o ABAQUS, zona 2, e não se verificará tão vincadamente na estrutura a conceber, uma vez que num chassi não existe uma condição fronteira bem distinta. Verifica-se ainda no canto superior direito, na zona 1, um efeito de concentração de tensões, mas que olhando atentamente, a coloração presente não parece ser alarmante, ainda assim esta situação será abordada no ponto seguinte (capítulo 8.6).

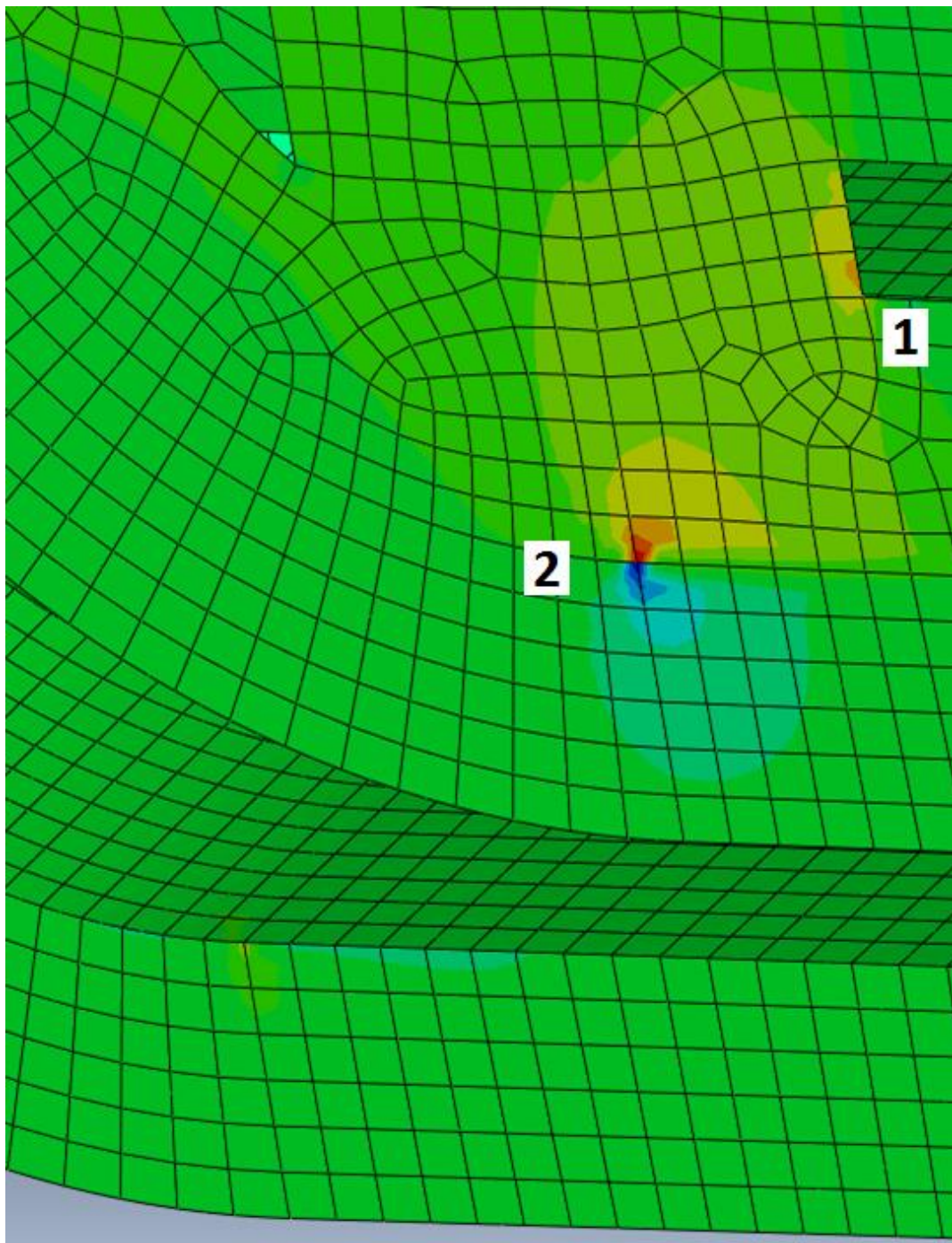


Figura 8.1 - Concentração de tensões na condição fronteira, evidenciada a vermelho e azul (Modelo 1DB, caso 4).

8.6 Considerações sobre os resultados obtidos

Em qualquer estrutura idealizada um dos pontos a se ter mais atenção é a concentração de tensões. Este assunto não pode ser tratado apenas observando os resultados obtidos. Apesar de as simulações provarem que as concentrações de tensões existentes estão dentro dos limites admissíveis para os materiais usados, é altamente recomendado que todos os ângulos de 90° sejam disfarçados, arredondados, de modo a se reduzirem estes efeitos e acrescentar material nessas zonas críticas. Os ângulos de 90° (como por exemplo na zona 1, Figura 8.1) são sempre potenciadores de roturas através de uma fenda que se irá propagar ao fim de vários ciclos, se o ângulo não for tão vincado o número de ciclos para a iniciação e propagação dessa fenda será exponencialmente superior de acordo com o cuidado e qualidade do acabamento do reforço dado nessa zona.

A Tabela 8.19 e Tabela 8.20 comprovam a validade do modelo de chassi 1DB para os diferentes onze casos testados, com alguma distinção, uma vez que, fora das zonas com concentrações de tensão, o chassi cumpre sem qualquer dificuldade todas as exigências requeridas.

9 Conclusões e Perspetivas de Trabalho futuro

O chassi tinha por objetivo suportar as diferentes exigências do quotidiano de um automóvel como o *Sado 550*. Estas exigências foram satisfeitas como se viu no capítulo 8. Se possível era ainda pretendido que a massa do chassi não fosse muito elevada e tal foi também respeitado, sendo que a massa do modelo final (1DB) é estimada em aproximadamente 75 kg.

Este projeto realizou-se em torno dos materiais compósitos, sendo alvo de estudo o comportamento dos compósitos em geral, qual o melhor material a aplicar na construção do chassi e que formas seriam as mais indicadas para se utilizarem.

Foram testados vários modelos de dois tipos diferentes, modelos que utilizavam vigas sanduíche e, modelos que utilizavam perfis pultrudidos da Fiberline. Após teste de cada modelo concluí que as vigas sanduíche à base de fibra de vidro, com núcleo em espuma de poliuretano apresentam os resultados mais satisfatórios.

Tendo em conta a dimensão do projeto e a utilização de materiais compósitos, em detrimento do aço ou alumínio, penso que o projeto cumpre os objetivos estabelecidos. Saliente-se que este projeto numa empresa do ramo automóvel não ficaria somente a cargo de um engenheiro, mas de uma equipa e provavelmente com prazos mais alargados.

As principais dificuldades residiram na dificuldade da procura pelas propriedades dos materiais utilizados, que não são os convencionais. Foi ainda necessário aprender a utilizar o *software* ABAQUS para proceder ao design e às várias simulações.

Um projeto deste tipo, futuramente, pode sempre ser alterado e melhorado, não existe uma única solução perfeita, mas umas quantas admissíveis, umas melhores que as outras. Poderiam ser utilizadas formas mais complexas em busca da redução de algum peso, ou de garantir tensões ainda mais baixas. No entanto, isso iria possivelmente dificultar o fabrico do chassi bem como o design. Poderia se optar por reforçar mais umas zonas em detrimento do reforço noutras zonas. Os ângulos retos poderiam ser evitados no desenho, mas isto por si só introduz um coeficiente de segurança (já que irão aparecer tensões elevadas nestes pontos e isso deixará o engenheiro atento), uma vez que na prática existem sempre pequenos raios de curvatura que diminuem a concentração de tensões, e foi salientado neste projeto que quando se for fabricar o chassi se tenha atenção e se “disfarce” estes ângulos retos e se introduza maiores raios de curvatura.

Referências

- Abreu, I. S. (2009). *Aplicações da Fibra de Carbono*. Obtido em 11 de abril de 2016, de Ebah: <http://www.ebah.pt/content/ABAAAAYuEAA/aplicacoes-fibra-carbono>
- ACP. (setembro e outubro de 1982). UM "MEGULHO" NO SADO. *ACP*, 36-43.
- Agarwal, B. D., & Broutman, L. J. (1980). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. Kanpur, Chicago: Wiley-Interscience.
- Almeida, P. M. (2013). *FEUP BUS/CIVITAS*. Tese de Mestrado, FEUP, Engenharia Mecânica, Porto.
- Alto. (2009). Obtido em 13 de junho de 2016, de Alto: <http://alto.pt/>
- Ashby, M. F. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford: Pergamon Press.
- Calzada, K. A., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., Samuel, J., & Srivastava, A. K. (2011). Modeling and interpretation of fiber orientation-based failure mechanisms in machining of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Manufacturing Processes*. Obtido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612511000338>
- Durão, L. M., Gonçalves, D. J., Tavares, J. M., Albuquerque, V. H., Panzerra, T. H., Vieira, A. A., & Batista, A. M. (2011). Estudo da delaminação associada à furação de compósitos reforçados com fibra de vidro e de sisal. *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*. Coimbra. Obtido de https://web.fe.up.pt/~tavares/downloads/publications/artigos/CMNE2011_Durao.pdf
- Euro x Dólar. (junho de 2016). Obtido de Portal Brasil: http://www.portalbrasil.net/indices_euro_dolar.htm
- Fiberline. (s.d.). *Pultrusion*. Obtido em 15 de julho de 2016, de Fiberline: <https://fiberline.com/pultrusion>
- Gay, D., & Hoa, S. V. (2007). *Composite Materials - Design and Applications*. Boca Raton - Flórida: Taylor & Francis Group.
- Hamann, R. (5 de março de 2015). *Fibra de carbono: como é feito e como funciona este material incrível*. Obtido em 11 de abril de 2016, de Tecmundo: <http://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>
- Holmes, M. (7 de janeiro de 2014). *Carbon fibre reinforced plastics market continues growth path*. Obtido em 11 de abril de 2016, de Reinforced Plastics: <http://www.materialstoday.com/carbon-fiber/features/carbon-fibre-reinforced-plastics-market-continues/>
- JCLE. (25 de agosto de 2006). *Curiosidades*. Obtido em 29 de março de 2016, de Site não oficial do SADO 550: <http://www.jcle.pt/sado550/>
- Marques, M. (5 de março de 2013). *Festa de lançamento do livro Sado 550*. Obtido em 30 de março de 2016, de Blog Sado 550: <http://sado550.blogspot.pt/2013/03/festa-de-lancamento-do-livro-sado-550.html>
- Motorizado, M. (setembro de 1982). Começou a venda do carro português «Sado 550». *MUNDO MOTORIZADO*, 9.
- Moura, M. F., Morais, A. B., & Magalhães, A. G. (2011). *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto: Publindústria.

- Pardal, A. C. (15 de janeiro de 2016). *Materiais Compósitos*. Obtido em 8 de julho de 2016, de knoow.net: <http://knoow.net/cienciasexactas/quimica/materiais-compositos/>
- Phillips, L. N. (1989). *Design with Advanced Composite Materials*. Londres: The Design Council.
- Piteira, C. (maio de 1983). AUTOMÓVEL FEITO EM PORTUGAL. *Mundo Motorizado*, 3, 4.
- Portal Brasil. (junho de 2016). *Euro x Dólar*. Obtido em 2 de Junho de 2016, de Portal Brasil: http://www.portalbrasil.net/indices_euro_dolar.htm
- Rodrigues, A. B. (3 de novembro de 2013). *As dez marcas de automóveis mais fiáveis do mundo*. Obtido em 11 de abril de 2016, de Sapo Turbo: <http://turbo.sapo.pt/ultimas/artigo/as-dez-marcas-de-automoveis-ma-9947.html>
- Rodrigues, J. C. (1995). Em J. C. Rodrigues, *O automóvel em Portugal* (pp. 129-135). Lisboa: CCT.
- Santos, T. (fevereiro de 2005). Sado 550 - O automóvel português produzido em série. *Topos & Clássicos*, 66-72.
- Santos, T. T. (2013). *Sado/550 - O Microcarro Português*. Museu do Caramulo.
- Teixeira, A. R. (2014). *Design of a Composite Chassis Car*. FEUP, Engenharia Mecânica, Porto.
- Tsai, S. W. (2008). *Strength & Life of Composites*. Stanford: Stanford University.
- Tsai, S. W., & Melo, J. D. (2015). *Composite Materials Design and Testing - Unlocking mystery with invariants*. Stanford - CA, USA: Stanford University.

ANEXO A: Propriedades dos Materiais

Anexo A.1 - Módulo de Young (4.1.1)

Aqui estão presentes as imagens que foram propositadamente omitidas do capítulo 4.1.1 - Módulo de Young. A explicação para a sua utilização está dada no mesmo capítulo.

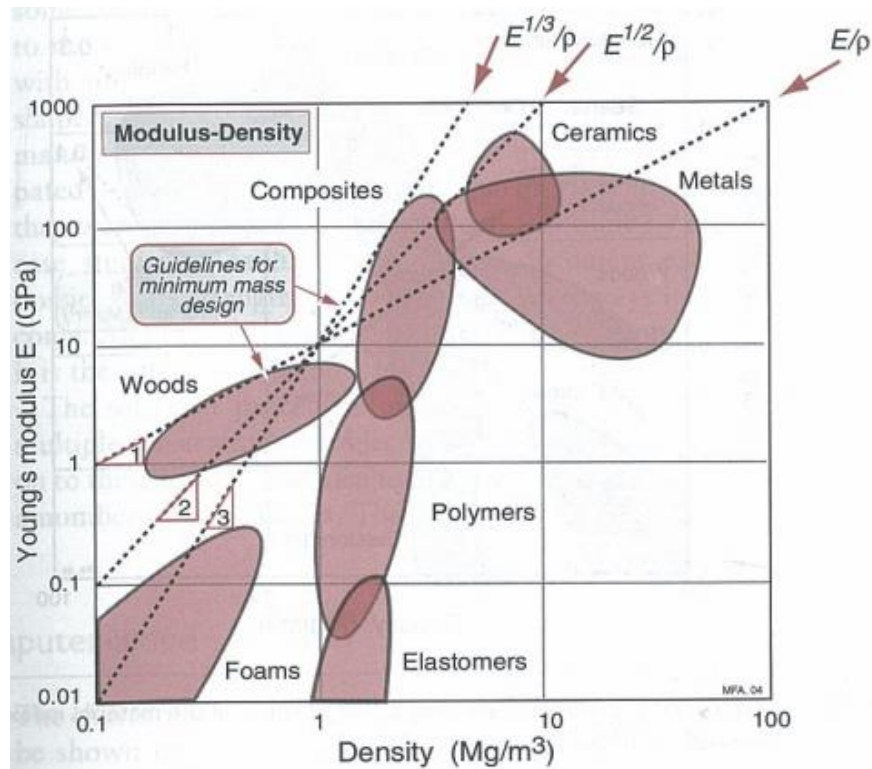


Figura 9.1 - Diagrama $E - \rho$ para três índices diferentes de material para obter máxima rigidez e mínima massa (Ashby, 2005).

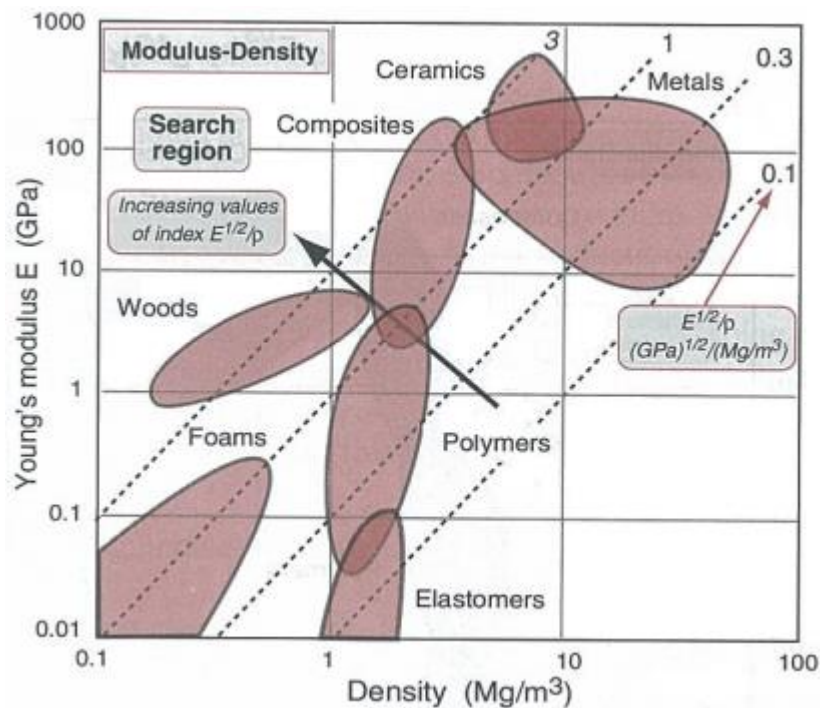


Figura 9.2 - Diagrama $E - \rho$ para o índice de material $M=E^{1/2}/\rho$ (Ashby, 2005).

Anexo A.2 - Tensão de rotura (4.1.2)

Aqui estão presentes as imagens que foram propositadamente omitidas do capítulo 4.1.2 - Tensão de rotura.

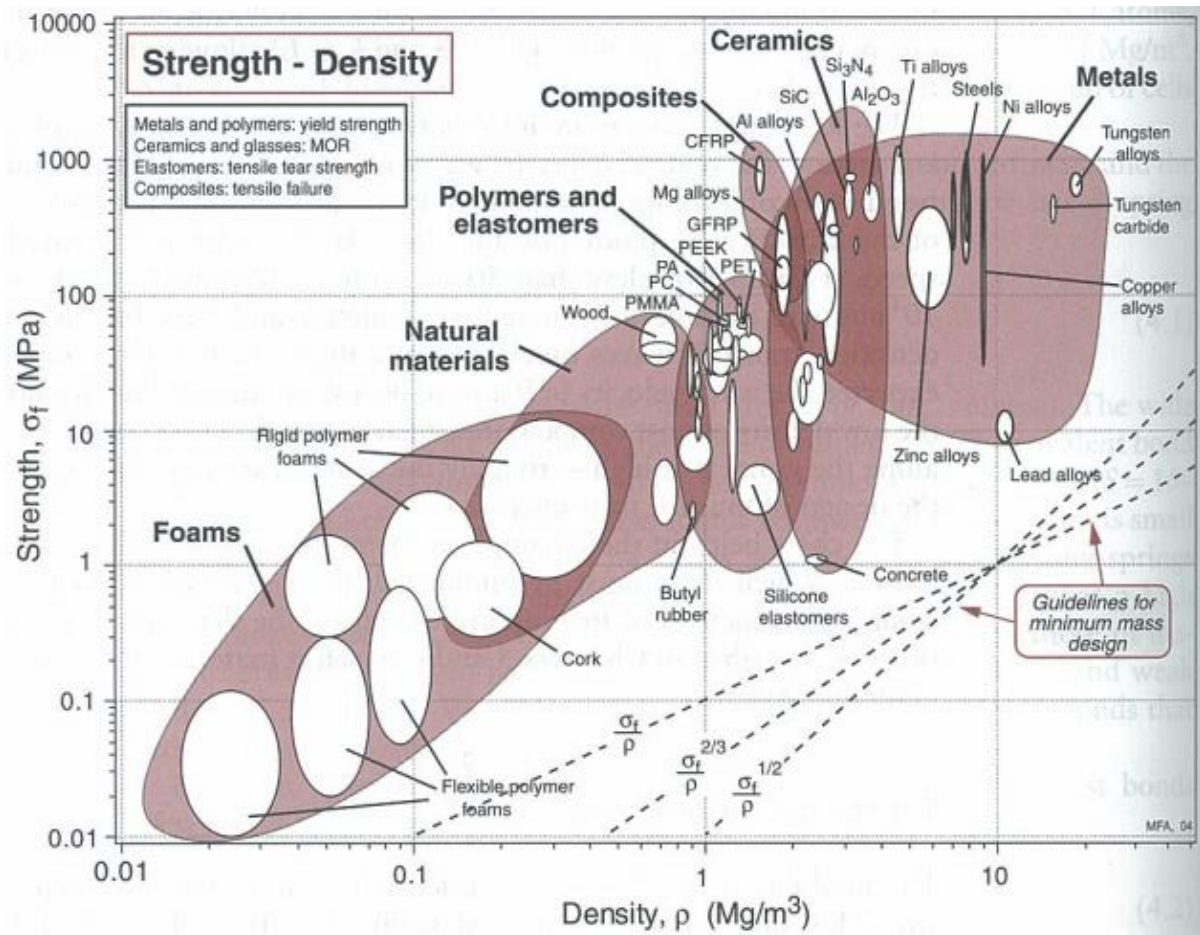


Figura 9.3 - Diagrama que coloca a tensão de rotura σ_f em função da densidade ρ e do material com três índices diferentes (Ashby, 2005).

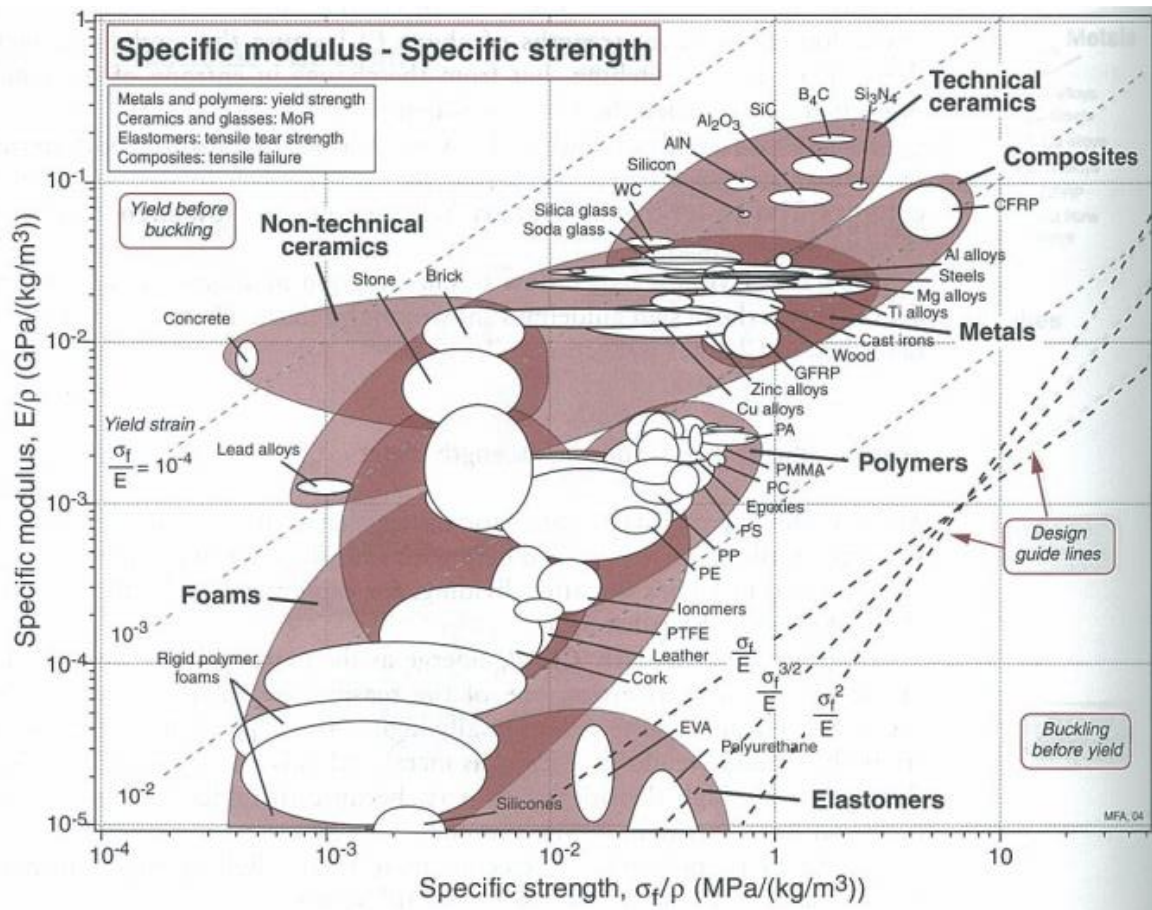


Figura 9.4 - Módulo específico, E/ρ , representado face à tensão de rotura específica, σ_f/ρ (Ashby, 2005).

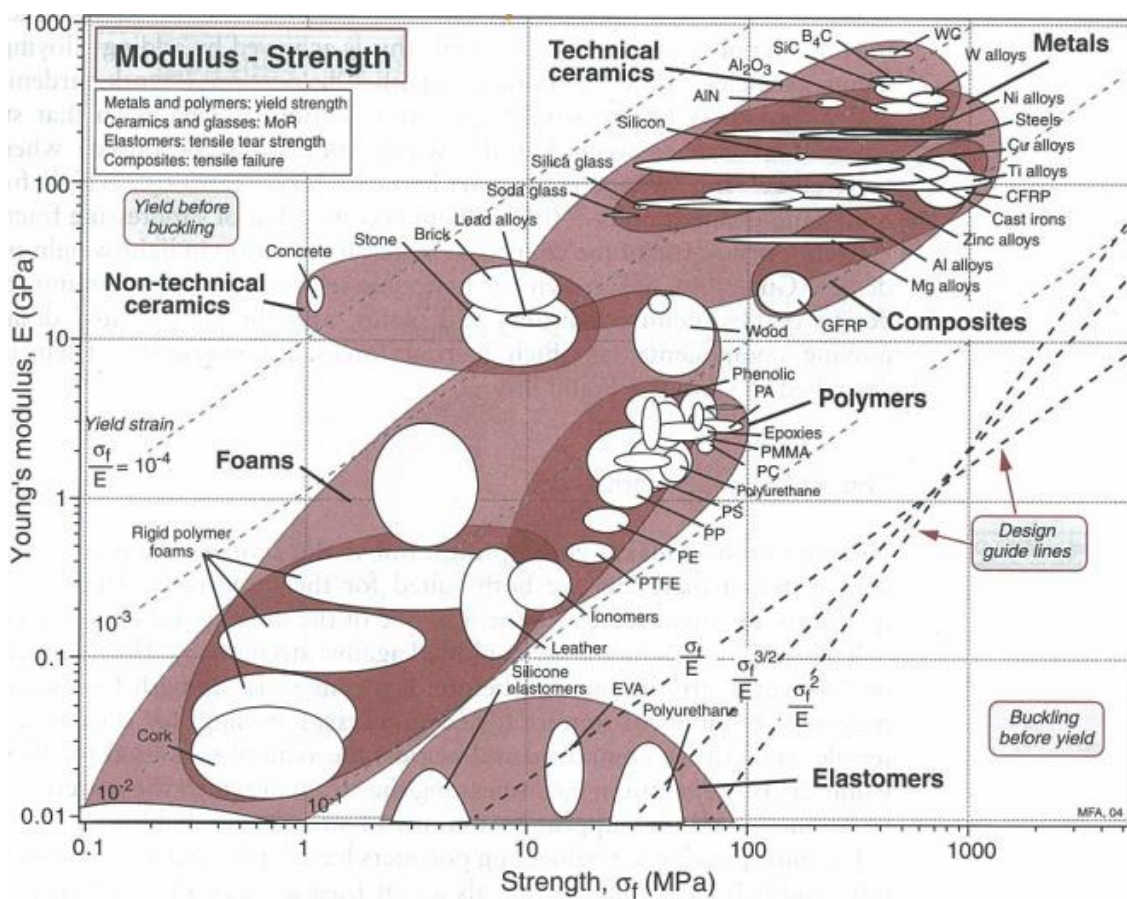


Figura 9.5 - Módulo de Young, E , representado face à tensão de rotura, σ_f (Ashby, 2005).

Anexo A.3 - Tenacidade à fratura (4.1.3)

Neste anexo estão presentes as imagens que foram propositadamente omitidas do capítulo 4.1.3 - Tenacidade à fratura.

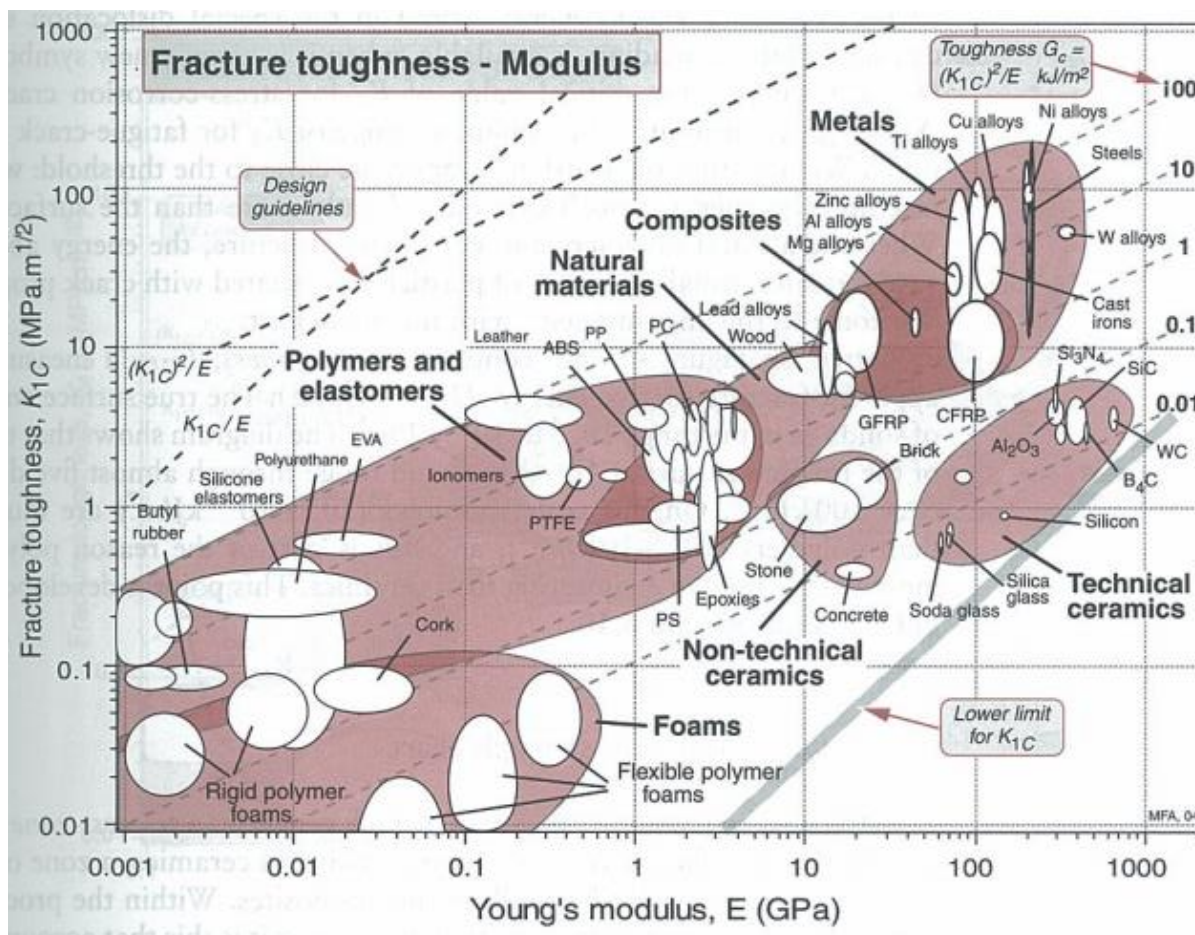


Figura 9.6 - Tenacidade à fratura, K_{1C} , representada face ao módulo de Young, E . A linha espessa representada a cinzento representa a "condição necessária" para fratura (Ashby, 2005).

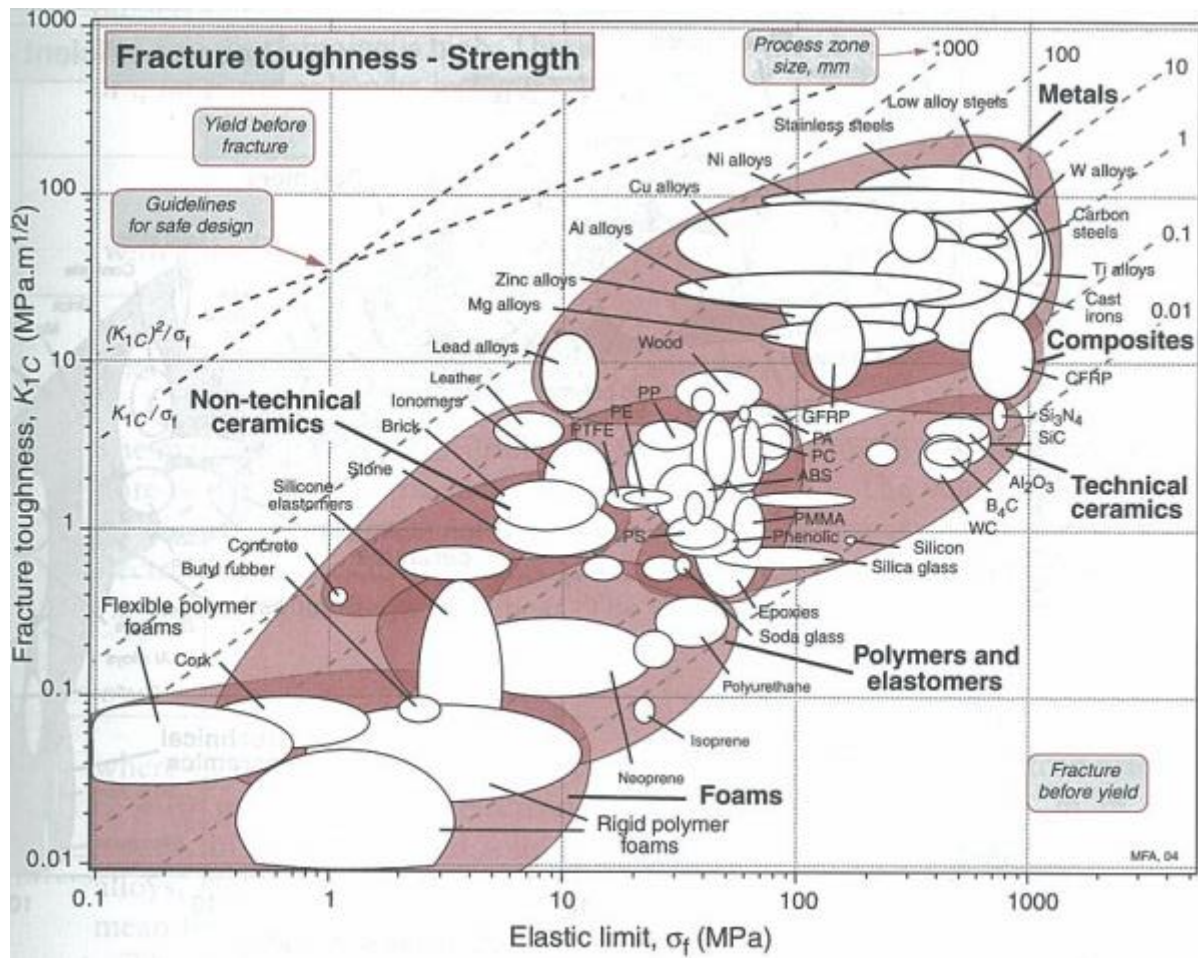


Figura 9.7 – Tenacidade à fratura, K_{1C} , representada face à tensão de rotura, σ_f . As *Guidelines* são usadas para escolher os materiais mais tolerantes ao dano (Ashby, 2005).

Anexo A.4 - Custos (4.1.5)

Neste anexo estão presentes as imagens que foram propositadamente omitidas do capítulo 4.1.5 - Custos.

DIAGRAMA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE – CUSTO RELATIVO

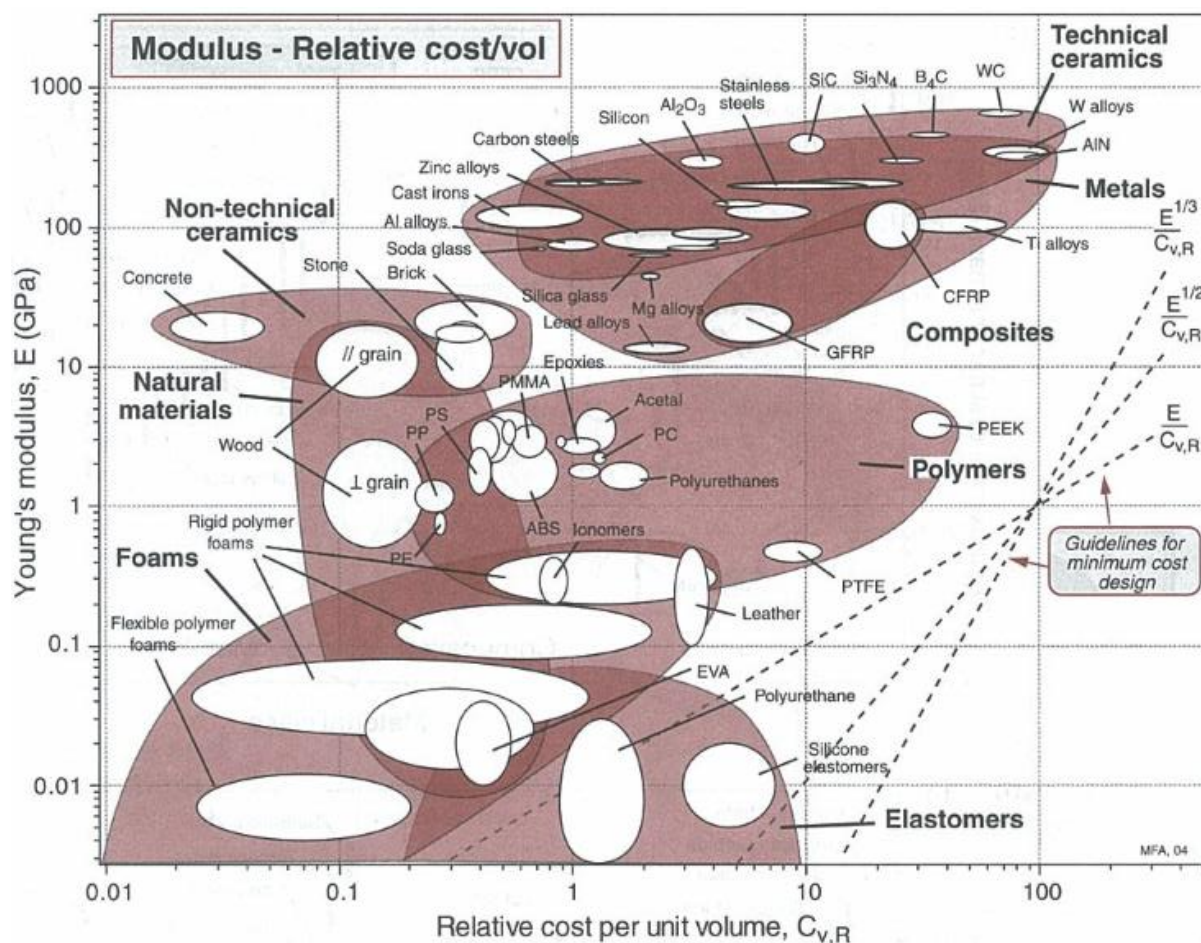


Figura 9.8 - Módulo de Young, E , representado face ao custo relativo por unidade de volume, $C_{v,R}$. As *guidelines* ajudam a maximizar a rigidez por unidade de custo (Ashby, 2005).

A Figura 9.8 mostra o módulo E representado face ao custo relativo por unidade de volume, $C_{v,R}$. Os materiais baratos e rígidos encontram-se no topo esquerdo. As *guidelines* para a melhor escolha encontram-se representadas na figura (Ashby, 2005).

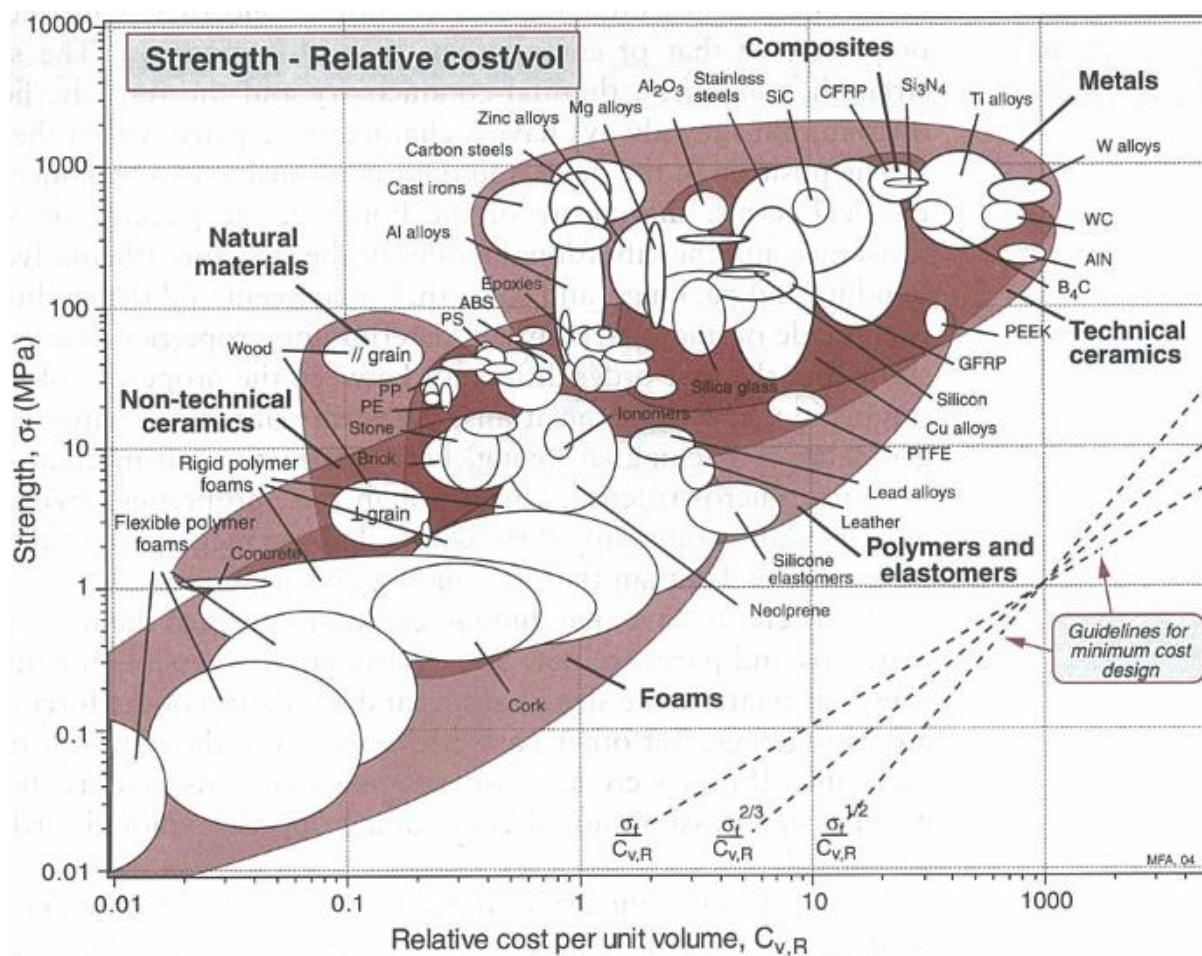
DIAGRAMA DA TENSÃO DE ROTURA – CUSTO RELATIVO

Figura 9.9 - Tensão de rotura, σ_f , representada face ao custo relativo por unidade de volume $C_{v,R}$. As *guidelines* ajudam a maximizar a tensão de rotura por unidade de custo (Ashby, 2005).

Materiais baratos e resistentes (com tensão de rotura elevada) podem ser escolhidos com recurso à Figura 9.9. Mostra a tensão de rotura, definida anteriormente no subcapítulo 4.1.2, representada face ao custo relativo por unidade de volume.

Interessa referir que a informação representada na Figura 9.8 e Figura 9.9 é menos confiável que a representada nos outros diagramas deste género, e são sujeitos a variação imprevisível. Apesar deste importante aviso, estes dois gráficos são genuinamente úteis. Eles permitem a seleção de material, usando o critério “função/aplicação por unidade de custo” (Ashby, 2005).

DIAGRAMA DE CUSTO POR UNIDADE DE VOLUME/MASSA

Interessa ainda mostrar o custo dos diferentes materiais por unidade de massa ou volume, para uma noção mais abrangente e não tão específica e restritiva como foi introduzido nas duas figuras anteriores. Estes diagramas têm ainda a mais valia de agrupar os materiais por categorias.

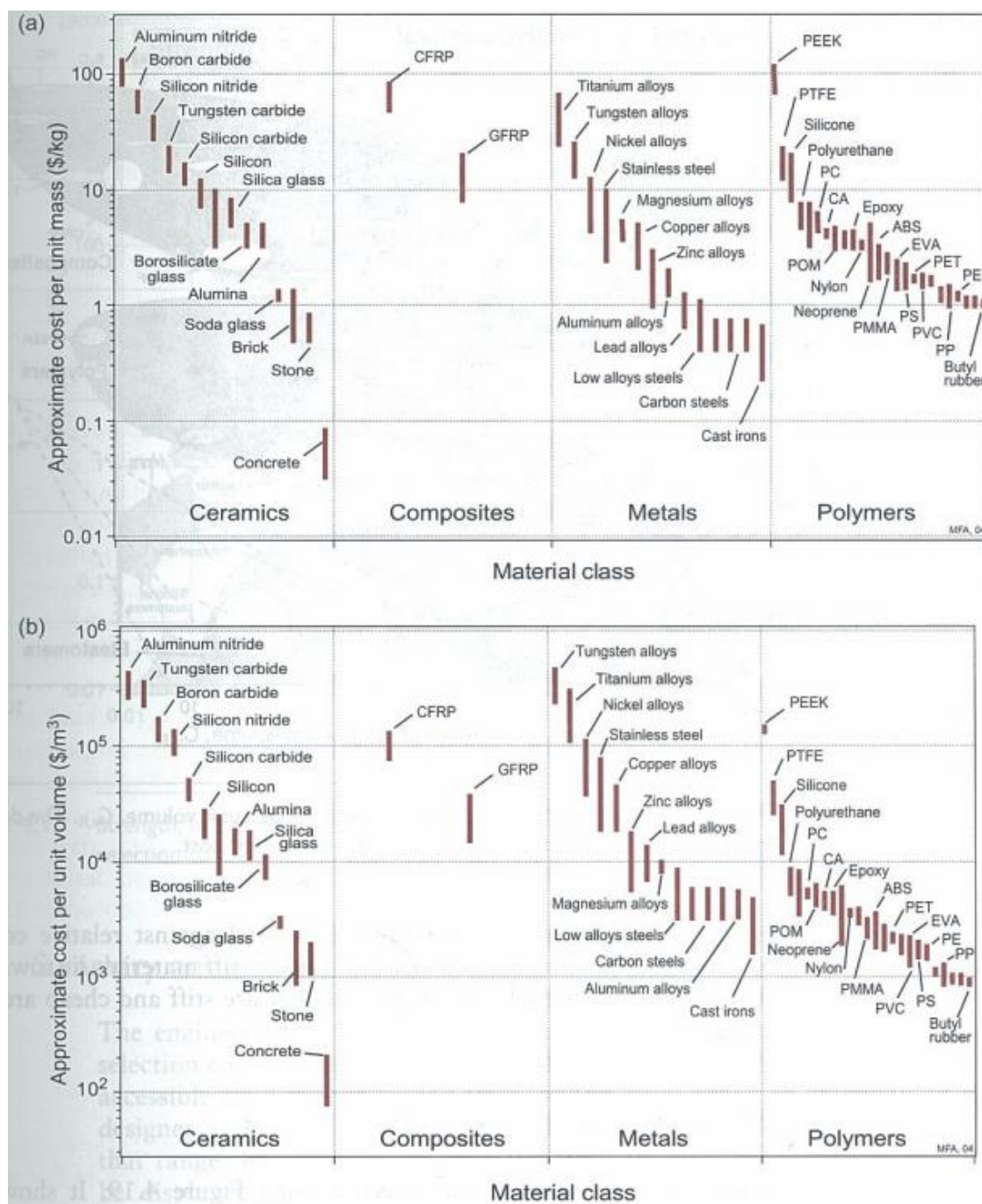
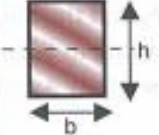

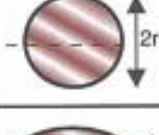
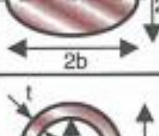

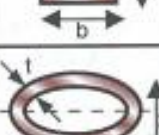
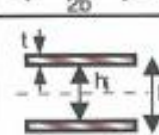
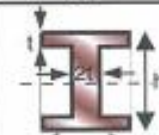
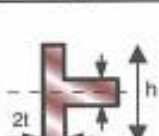



Figura 9.10 - a) Custo aproximado por unidade de massa \$/kg. Os materiais mais correntes custam aproximadamente \$1/kg, materiais “especiais” podem custar muito mais. b) Custo aproximado por unidade de volume \$/m³ (Ashby, 2005).

ANEXO B: Fatores de Forma












Anexo B.1 - Áreas, Momentos das secções e unidades (4.2.1)

Tabela 9.1 - Áreas, Momentos de segunda ordem das secções e Unidades (Ashby, 2005).

Section shape	Area A m	Moment I m ⁴	Moment K m ⁴	Moment Z m ⁴	Moment Q m ⁴	Moment Z _p m ⁴
	bh	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^3}{3}(1-0.58\frac{b}{h})$ (h > b)	$\frac{bh^2}{6}$	$\frac{b^2h^2}{(3h+1.8b)}$ (h > b)	$\frac{bh^2}{4}$
	$\frac{\sqrt{3}}{4}a^2$	$\frac{a^4}{32\sqrt{3}}$	$\frac{\sqrt{3}a^4}{80}$	$\frac{a^3}{32}$	$\frac{a^3}{20}$	$\frac{3a^3}{64}$
	πr^2	$\frac{\pi}{4}r^4$	$\frac{\pi}{2}r^4$	$\frac{\pi}{4}r^3$	$\frac{\pi}{2}r^3$	$\frac{\pi}{3}r^3$
	πab	$\frac{\pi}{4}a^3b$	$\frac{\pi a^3b^3}{(a^2+b^2)}$	$\frac{\pi}{4}a^2b$	$\frac{\pi}{2}a^2b$ (a < b)	$\frac{\pi}{3}a^2b$
	$\pi(r_o^2 - r_i^2)$ $\approx 2\pi r t$	$\frac{\pi}{4}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^3 t$	$\frac{\pi}{2}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^3 t$	$\frac{\pi}{4r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx \pi r^2 t$	$\frac{\pi}{2r_o}(r_o^4 - r_i^4)$ $\approx 2\pi r^2 t$	$\frac{\pi}{3}(r_o^3 - r_i^3)$ $\approx \pi r^2 t$
	2t(h+b) (h, b >> t)	$\frac{1}{6}h^3t(1+3\frac{b}{h})$	$\frac{2tb^2h^2}{(h+b)}(1-\frac{t}{h})^4$	$\frac{1}{3}h^2t(1+3\frac{b}{h})$	$2tbh(1-\frac{t}{h})^2$	$bht(1+\frac{h}{2b})$
	$\pi(a+b)t$ (a, b >> t)	$\frac{\pi}{4}a^3t(1+\frac{3b}{a})$	$\frac{4\pi(ab)^{5/2}t}{(a^2+b^2)}$	$\frac{\pi}{4}a^2t(1+\frac{3b}{a})$	$2\pi t(a^3b)^{1/2}$ (b > a)	$\pi abt(2+\frac{a}{b})$
	b(h_o - h_i) $\approx 2bt$ (h, b >> t)	$\frac{b}{12}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx \frac{1}{2}bth_o^2$	--	$\frac{b}{6h_o}(h_o^3 - h_i^3)$ $\approx bth_o$	--	$\frac{b}{4}(h_o^2 - h_i^2)$ $\approx bth_o$
	2t(h+b) (h, b >> t)	$\frac{1}{6}h^3t(1+3\frac{b}{h})$	$\frac{2}{3}bt^3(1+4\frac{h}{b})$	$\frac{1}{3}h^2t(1+3\frac{b}{h})$	$\frac{2}{3}bt^2(1+4\frac{h}{b})$	$bht(1+\frac{h}{2b})$
	2t(h+b) (h, b >> t)	$\frac{1}{6}(h^3 + 4bt^2)$	$\frac{t^3}{3}(8b + h)$	$\frac{1}{3h}(h^3 + 4bt^2)$	$\frac{t^2}{3}(8b + h)$	$\frac{th^2}{2}\{1 + \frac{2t(b-2t)}{h^2}\}$

Anexo B.2 - Fatores de eficiência de forma (4.2.1)

Tabela 9.2 - Fatores de eficiência de forma (Ashby, 2005).

Section shape	Bending factor, φ_B^E	Torsional factor, φ_T^E	Bending factor, φ_B^F	Torsional factor, φ_T^F	Bending factor, φ_B^{pl}
	$\frac{h}{b}$	$2.38 \frac{h}{b} \left(1 - 0.58 \frac{b}{h}\right)$ ($h > b$)	$\left(\frac{h}{b}\right)^{0.5}$	$1.6 \sqrt{\frac{b}{h}} \frac{1}{(1 + 0.6b/h)}$ ($h > b$)	$\left(\frac{h}{b}\right)^{0.5}$
	$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$	0.832	$\frac{3^{1/4}}{2} = 0.658$	0.83	$\frac{3^{1/4}}{2} = 0.658$
	$\frac{3}{\pi} = 0.955$	1.14	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} = 0.846$	1.35	$\frac{4}{3\sqrt{\pi}} = 0.752$
	$\frac{3a}{\pi b}$	$\frac{2.28ab}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{b}}$	$1.35 \sqrt{\frac{a}{b}}$ ($a < b$)	$\frac{4}{3\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{b}} = 0.752 \sqrt{\frac{a}{b}}$
	$\frac{3}{\pi} \left(\frac{r}{t}\right)$ ($r \gg t$)	$1.14 \left(\frac{r}{t}\right)$	$\frac{3}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{t}}$	$1.91 \sqrt{\frac{r}{t}}$	$\sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{r}{t}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^2}$ ($h, b \gg t$)	$\frac{3.57b^2(1 - t/h)^4}{th(1 + b/h)^3}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^{3/2}}$	$3.39 \sqrt{\frac{h^2}{bt}} \frac{1}{(1 + h/b)^{3/2}}$	$\sqrt{2} \sqrt{\frac{h^2}{bt}} \frac{(1 + h/2b)}{(1 + h/b)^{3/2}}$
	$\frac{3a(1 + 3b/a)}{\pi t(1 + b/a)^2}$ ($a, b \gg t$)	$\frac{9.12(ab)^{5/2}}{t(a^2 + b^2)(a + b)^2}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{(1 + 3b/a)}{(1 + b/a)^{3/2}}$	$5.41 \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{1}{(1 + a/b)^{3/2}}$	$\frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a^2}{bt}} \frac{(2 + a/b)}{(1 + a/b)^{3/2}}$
	$\frac{3h_o^2}{2bt}$ ($h, b \gg t$)	—	$\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{h_o}{\sqrt{bt}}$	—	$\sqrt{2} \frac{h_o}{\sqrt{bt}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h(1 + 3b/h)}{t(1 + b/h)^2}$ ($h, b \gg t$)	$1.19 \left(\frac{t}{b}\right) \frac{(1 + 4h/b)}{(1 + h/b)^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^{3/2}}$	$1.13 \sqrt{\frac{t}{b}} \frac{(1 + 4h/b)}{(1 + h/b)^{3/2}}$	$\sqrt{2} \sqrt{\frac{h^2}{bt}} \frac{(1 + h/2b)}{(1 + h/b)^{3/2}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h(1 + 4bt^2/h^3)}{t(1 + b/h)^2}$ ($h, b \gg t$)	$0.595 \left(\frac{t}{h}\right) \frac{(1 + 8b/h)}{(1 + b/h)^2}$	$\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + 4bt^2/h^3)}{(1 + b/h)^{3/2}}$	$0.565 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + 8b/h)}{(1 + b/h)^{3/2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \left(\frac{h}{(h+b)}\right)^{3/2} \left[1 + \frac{2t(b-2t)}{h^2}\right]$
	$\frac{1}{2} \frac{h(1 + 4bt^2/h^3)}{t(1 + b/h)^2}$ ($h, b \gg t$)	$1.19 \left(\frac{t}{h}\right) \frac{(1 + 4b/h)}{(1 + b/h)^2}$	$\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + 4bt^2/h^3)}{(1 + b/h)^{3/2}}$	$1.13 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + 4b/h)}{(1 + b/h)^{3/2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \left(\frac{h}{(h+b)}\right)^{3/2} \left[1 + \frac{2t(b-2t)}{h^2}\right]$

Anexo B.3 - O mapa dos 4 quadrantes, explicação (4.4)

As imagens aqui presentes fazem parte do capítulo 4.4.

Aqui são apresentadas algumas dicas para uma simples utilização do mapa dos 4 quadrantes:

1. Escolha um material para a secção e marque o seu módulo, E , e densidade, ρ , no mapa 'Material', no primeiro quadrante da Figura 9.11;
2. Escolha a rigidez desejada (EI); é uma condição que deve ser imposta com a secção. Trace uma horizontal desde o valor E para a linha apropriada no mapa 'Constraint', no segundo quadrante;
3. Trace uma vertical desde esse ponto até ao mapa 'Shape' no terceiro quadrante para a linha que corresponde ao fator de forma da secção ϕ_B^e ; valores para I ou A fora da zona sombreada não são permitidos;
4. Trace uma horizontal desde esse ponto para o mapa 'Performance' no canto inferior esquerdo. Trace uma vertical desde a densidade do material, no mapa 'Material'. A interseção mostra-nos a massa por unidade de comprimento da secção.

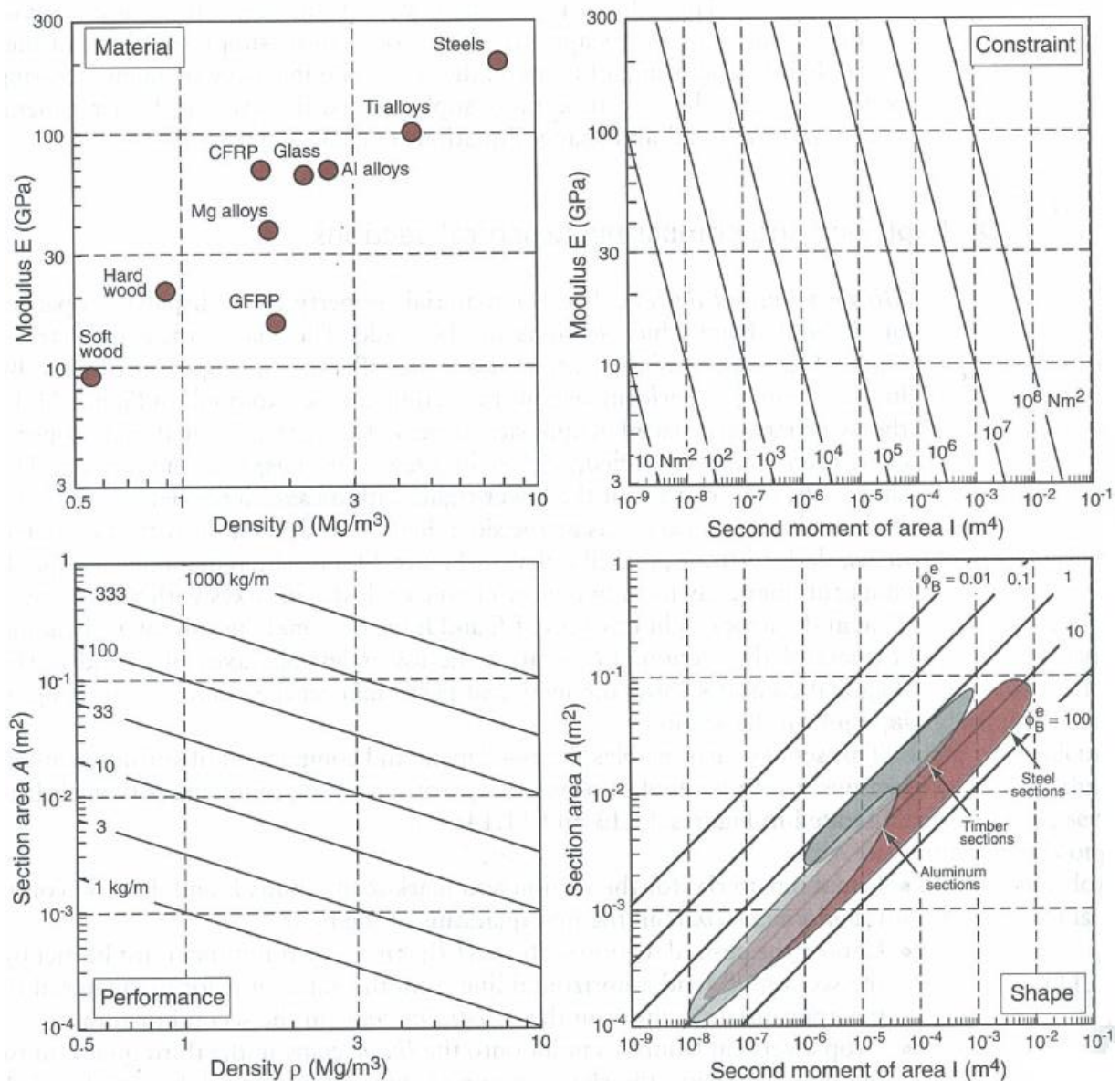


Figura 9.11 - O mapa dos 4 quadrantes é utilizado para explorar secções estruturais para design limitado à rigidez. Cada mapa partilha os seus eixos com os mapas adjacentes (Ashby, 2005).

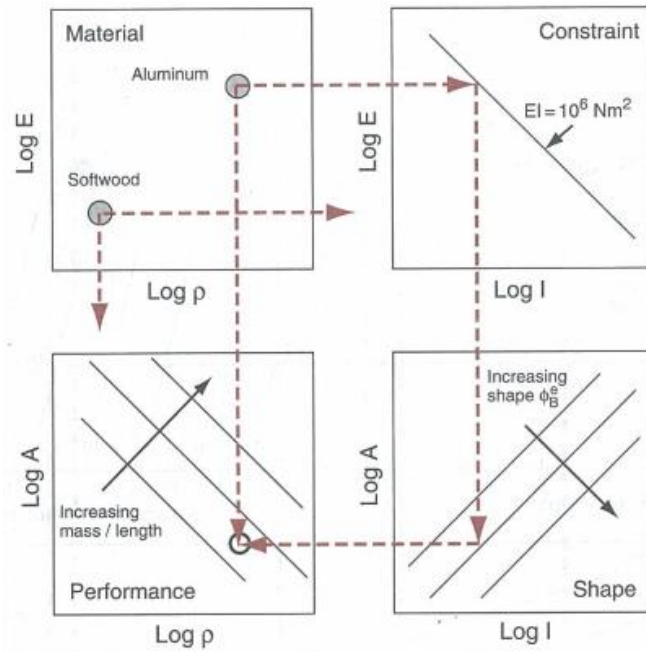


Figura 9.12 – Esquema demonstrativo de como usar o mapa dos quatro quadrantes (Ashby, 2005).

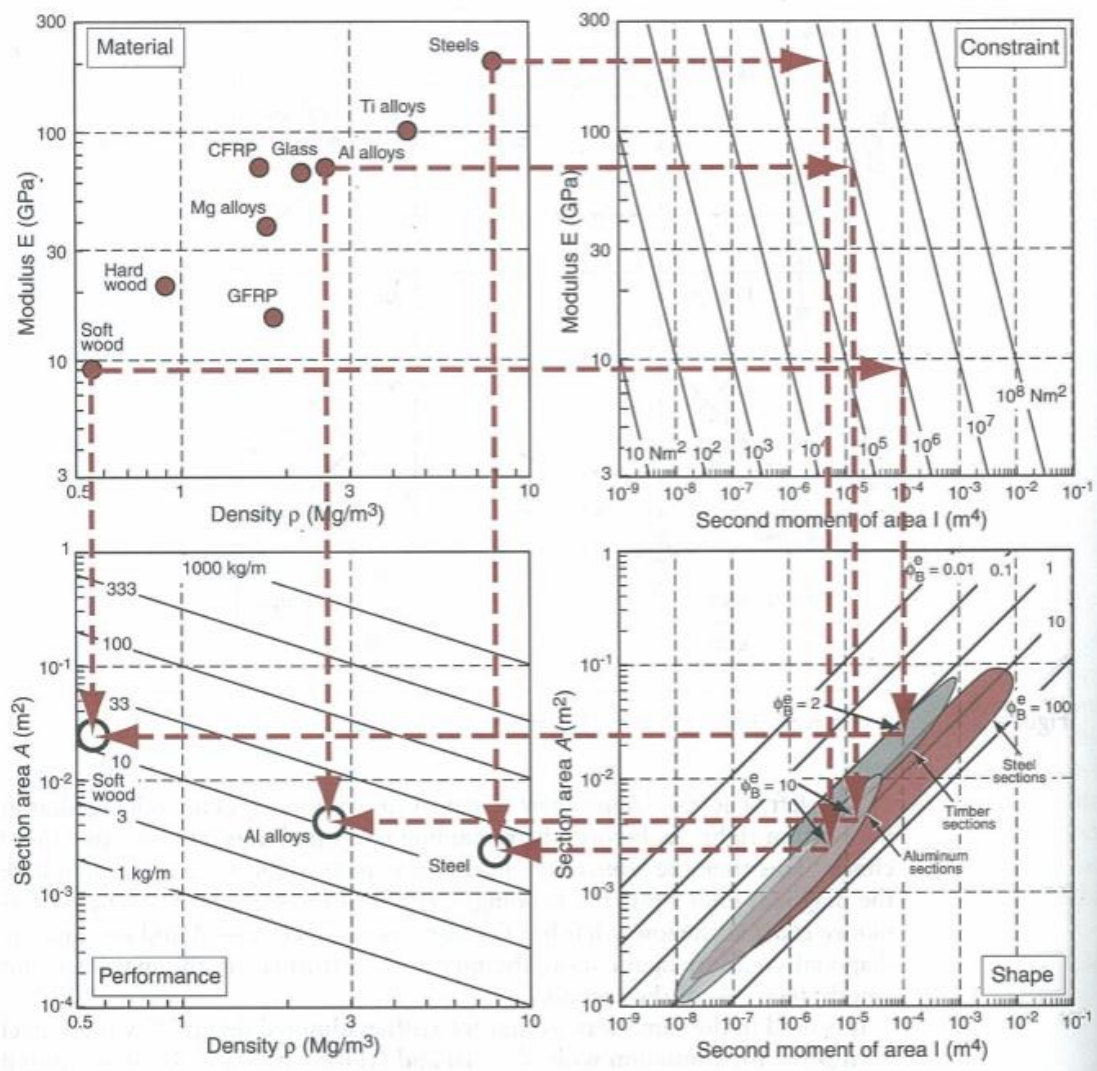


Figura 9.13 – Uma comparação de seções de aço, alumínio e madeira (steel, aluminium, wood) para um design limitado à rigidez, com $EI=10^6$ N.m (Ashby, 2005).

Anexo B.4 - Flexão de vigas

	C_1	C_2	
	3	2	$\delta = \frac{FL^3}{C_1EI} = \frac{ML^2}{C_1EI}$
	8	6	$\theta = \frac{FL^2}{C_2EI} = \frac{ML}{C_2EI}$
	2	1	
	48	16	$I = \text{See Table A.2 (m}^4\text{)}$
	$\frac{384}{5}$	24	$E = \text{Youngs modulus (N/m}^2\text{)}$
	192	-	$\delta = \text{Deflection (m)}$
	384	-	$F = \text{Force (N)}$
	6	-	$M = \text{Moment (Nm)}$
	-	4	$L = \text{Length (m)}$
	-	3	$b = \text{Width (m)}$
			$t = \text{Depth (m)}$
			$\theta = \text{End slope (-)}$
			$y = \text{Distance from N.A. (m)}$
			$R = \text{Radius of curvature (m)}$
			$\frac{\sigma}{y} = \frac{M}{I} = \frac{M}{R}$

Figura 9.14 – Constantes que são utilizadas no cálculo de deslocamentos e rotações de vigas, para diferentes solicitações e condições fronteira (Ashby, 2005).

ANEXO C: Controlo de Qualidade das Estruturas Sanduíche

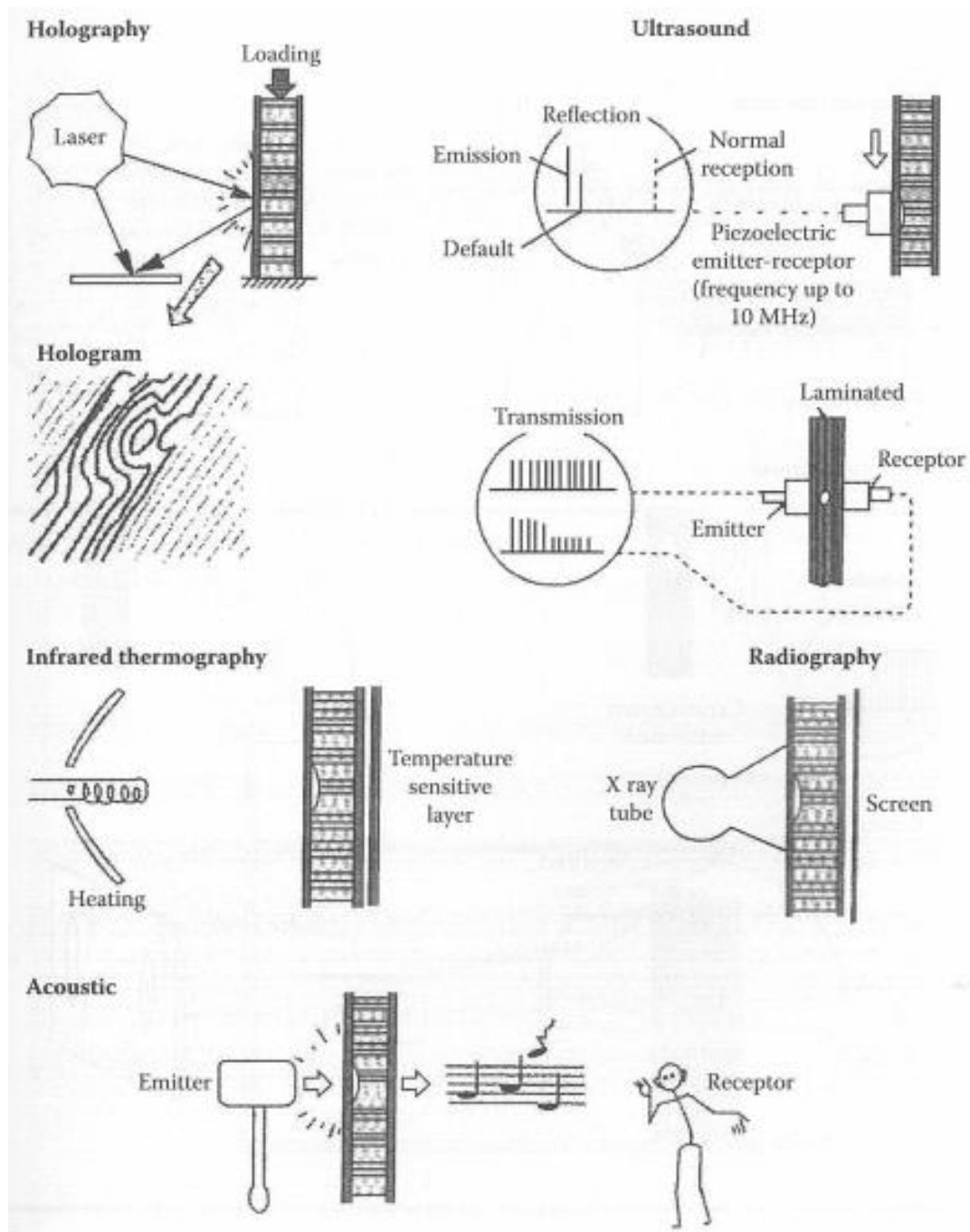


Figura 9.15 - Principais métodos de teste não destrutivos de estruturas sanduíche (Gay & Hoa, 2007).

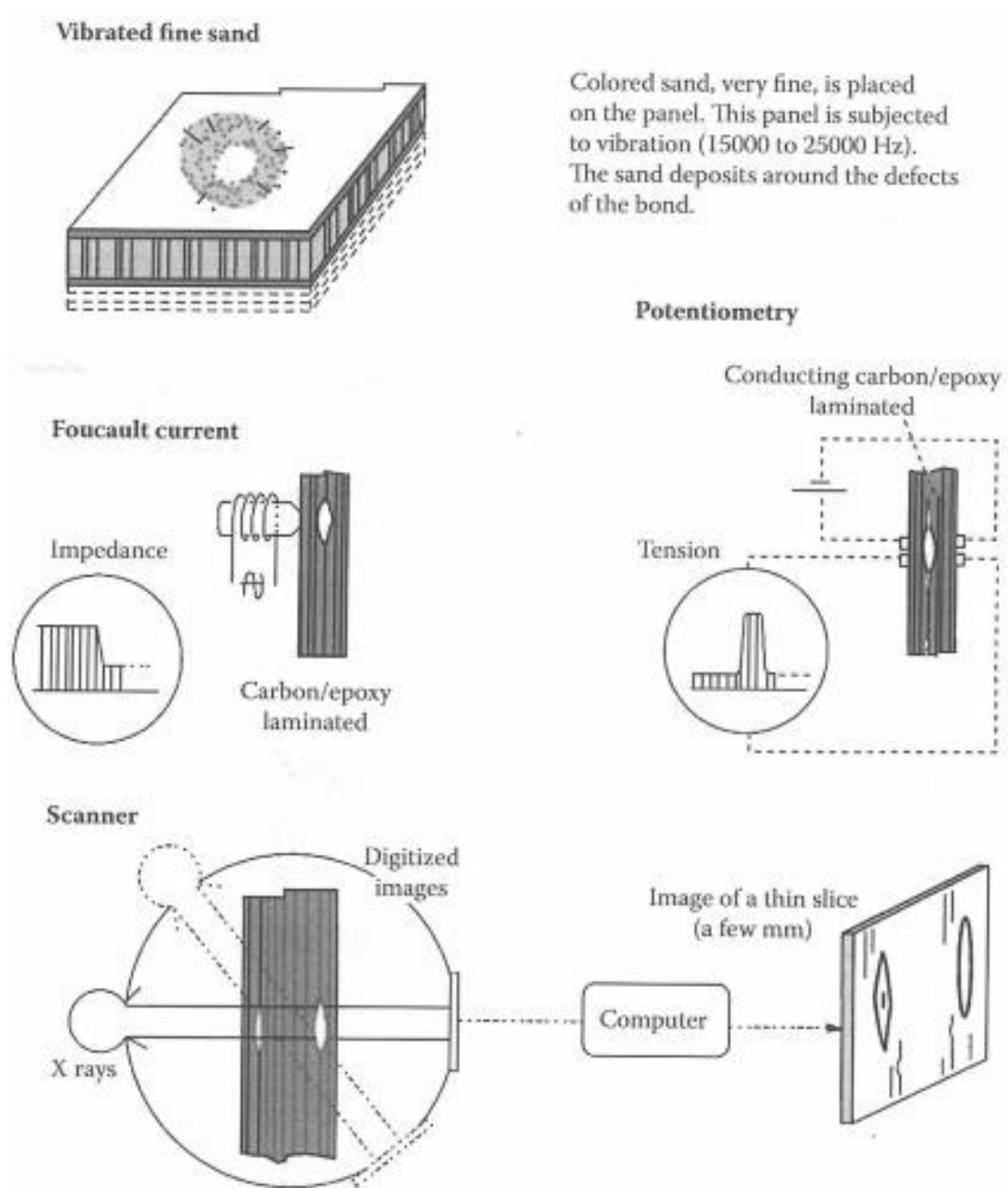


Figura 9.16 – Principais métodos de teste não destrutivos de estruturas sanduíche (continuação) (Gay & Hoa, 2007).

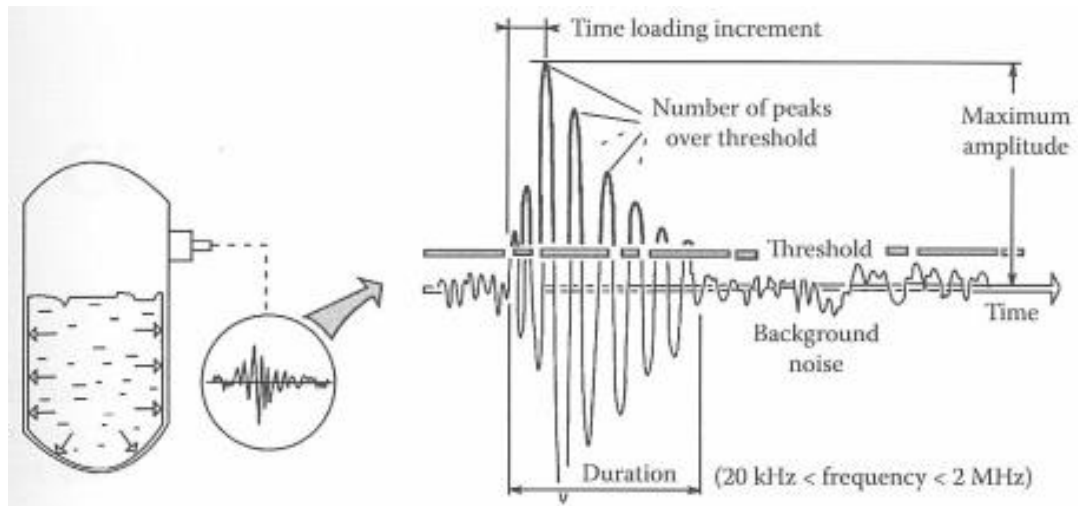


Figura 9.17 - Técnica de emissão acústica (Gay & Hoa, 2007).

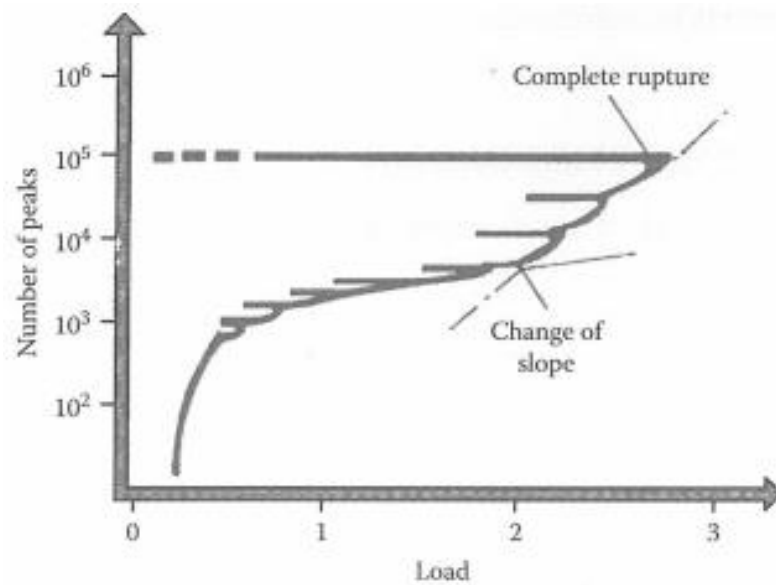


Figura 9.18 – Representação de um evento de emissão acústica (Gay & Hoa, 2007).

ANEXO D: Resultados obtidos para os diferentes chassis

Anexo D.1 - Resultados para o Modelo 1

MODELO 1						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	46,88	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	332,00	256,23			1062	<25%
S11-	-371,10	-488,36			-610	<35%
S22+	108,40	113,79			31	<45%
S22-	-94,16	-86,11			-118	<55%
S12+	105,90	75,37			72	>55%
S12-	-84,31	-55,40			-72	

MODELO 1						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	46,88	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	444,00	383,95			1062	<25%
S11-	-490,40	-419,56			-610	<35%
S22+	118,80	174,33			31	<45%
S22-	-101,00	-111,94			-118	<55%
S12+	116,40	91,61			72	>55%
S12-	-97,31	-62,11			-72	

MODELO 1						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	46,88	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	568,20	314,03			1062	<25%
S11-	-427,60	-375,63			-610	<35%
S22+	236,40	147,97			31	<45%
S22-	-189,60	-114,67			-118	<55%
S12+	90,83	75,79			72	>55%
S12-	-75,61	-55,10			-72	

MODELO 1						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	46,88	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	140	Limite	
S11+	689,00	344,90		mm	1062	<25%
S11-	-741,20	-380,35			-610	<35%
S22+	148,20	195,39			31	<45%
S22-	-148,20	-123,17			-118	<55%
S12+	146,50	95,06			72	>55%
S12-	-126,10	-70,66			-72	

Resultados do Modelo 1A

MODELO 1A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	47,62	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	55,02	Limite	
S11+	220,60	194,33	mm		1062	<25%
S11-	-236,20	-224,18			-610	<35%
S22+	24,99	22,89			31	<45%
S22-	-18,76	-20,73			-118	<55%
S12+	29,68	35,72			72	>55%
S12-	-23,46	-19,41			-72	

MODELO 1A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	47,62	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	252,70	209,13			1062	<25%
S11-	-253,40	-207,80			-610	<35%
S22+	26,77	28,96			31	<45%
S22-	-21,85	-47,30			-118	<55%
S12+	33,08	39,43			72	>55%
S12-	-24,54	-23,69			-72	

MODELO 1A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	47,62	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	169,70	238,34			1062	<25%
S11-	-229,30	-231,64			-610	<35%
S22+	28,30	36,84			31	<45%
S22-	-43,87	-54,81			-118	<55%
S12+	38,09	46,31			72	>55%
S12-	-31,52	-29,09			-72	

MODELO 1A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	47,62	<i>Dimensões</i>	3*9*3
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	55,35	Limite	
S11+	319,10	279,40	mm		1062	<25%
S11-	-319,30	-324,40			-610	<35%
S22+	31,65	43,31			31	<45%
S22-	-31,65	-42,34			-118	<55%
S12+	34,27	39,34			72	>55%
S12-	-34,76	-22,03			-72	

Resultados do Modelo 1B

MODELO 1B						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	63,5	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	40,24	Limite	
S11+	160,40	148,25	mm		1062	<25%
S11-	-174,20	-172,18			-610	<35%
S22+	17,50	17,49			31	<45%
S22-	-14,68	-15,90			-118	<55%
S12+	21,94	25,60			72	>55%
S12-	-16,62	-11,40			-72	

MODELO 1B						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	63,5	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	182,60	159,51			1062	<25%
S11-	-186,20	-200,45			-610	<35%
S22+	19,52	21,92			31	<45%
S22-	-16,76	-23,82			-118	<55%
S12+	24,45	27,92			72	>55%
S12-	-17,44	-11,76			-72	

MODELO 1B						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	63,5	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	129,70	153,55			1062	<25%
S11-	-167,60	-210,96			-610	<35%
S22+	19,59	27,67			31	<45%
S22-	-26,53	-29,22			-118	<55%
S12+	27,52	32,47			72	>55%
S12-	-23,11	-17,45			-72	

MODELO 1B						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	63,5	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	40,49	Limite	
S11+	228,10	212,91	mm		1062	<25%
S11-	-228,20	-247,70			-610	<35%
S22+	23,58	32,35			31	<45%
S22-	-23,59	-27,19			-118	<55%
S12+	23,35	34,46			72	>55%
S12-	-24,94	-16,08			-72	

Resultados do Modelo 1C

MODELO 1C						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	65,02	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	36,86	Limite	
S11+	98,46	134,20	mm		1062	<25%
S11-	-127,80	-156,26			-610	<35%
S22+	11,81	17,34			31	<45%
S22-	-14,22	-17,82			-118	<55%
S12+	18,48	22,59			72	>55%
S12-	-15,88	-10,40			-72	

MODELO 1C						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	65,02	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	36,99	Limite	
S11+	105,30	144,59	mm		1062	<25%
S11-	-147,10	-180,74			-610	<35%
S22+	14,28	13,10			31	<45%
S22-	-17,62	-16,59			-118	<55%
S12+	21,04	25,83			72	>55%
S12-	-17,93	-11,69			-72	

MODELO 1C						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	65,02	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	37,07	Limite	
S11+	119,30	163,44	mm		1062	<25%
S11-	-167,00	-193,99			-610	<35%
S22+	17,90	22,58			31	<45%
S22-	-22,86	-25,19			-118	<55%
S12+	24,89	29,44			72	>55%
S12-	-22,08	-20,06			-72	

MODELO 1C						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	65,02	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	37,12	Limite	
S11+	133,40	191,78	mm		1062	<25%
S11-	-184,10	-212,41			-610	<35%
S22+	20,72	26,47			31	<45%
S22-	-26,45	-24,09			-118	<55%
S12+	27,80	31,83			72	>55%
S12-	-25,14	-23,41			-72	

Resultados do Modelo 1D

MODELO 1D						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	26,09	Limite	
S11+	88,19	103,21	mm		1062	<25%
S11-	-124,40	-152,25			-610	<35%
S22+	11,47	16,75			31	<45%
S22-	-13,58	-17,11			-118	<55%
S12+	11,49	21,93			72	>55%
S12-	-13,58	-10,05			-72	

MODELO 1D						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	95,77	111,14			1062	<25%
S11-	-143,10	-165,48			-610	<35%
S22+	13,86	12,65			31	<45%
S22-	-16,85	-15,99			-118	<55%
S12+	20,51	25,08			72	>55%
S12-	-17,38	-13,35			-72	

MODELO 1D						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	26,27	Limite	
S11+	112,70	123,20	mm		1062	<25%
S11-	-162,40	-189,07			-610	<35%
S22+	17,37	23,59			31	<45%
S22-	-21,91	-24,01			-118	<55%
S12+	24,31	28,60			72	>55%
S12-	-21,44	-19,52			-72	

MODELO 1D						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	26,30	Limite	
S11+	127,5	140,92	mm		1062	<25%
S11-	178,90	-207,04			-610	<35%
S22+	20,10	20,28			31	<45%
S22-	-25,37	-23,14			-118	<55%
S12+	27,18	28,60			72	>55%
S12-	-24,42	-22,78			-72	

MODELO 1D						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	3	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			U3=	26,35	Limite	
S11+	159,20	182,03	mm		1062	<25%
S11-	-212,70	-244,65			-610	<35%
S22+	24,71	25,68			31	<45%
S22-	-30,68	-28,51			-118	<55%
S12+	32,47	35,59			72	>55%
S12-	-30,43	-29,27			-72	

Resultados do Modelo 1DA

MODELO 1DA						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			U3=	31,45	Limite	
S11+	107,30	126,97	mm		1062	<25%
S11-	-136,80	-187,13			-610	<35%
S22+	9,83	9,03			31	<45%
S22-	-11,38	-13,08			-118	<55%
S12+	13,87	18,02			72	>55%
S12-	-16,35	-13,20			-72	

MODELO 1DA						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			U3=	31,57	Limite	
S11+	114,30	137,06	mm		1062	<25%
S11-	-160,00	-217,14			-610	<35%
S22+	11,82	11,05			31	<45%
S22-	-13,82	-15,76			-118	<55%
S12+	15,85	20,44			72	>55%
S12-	-18,49	-16,32			-72	

MODELO 1DA						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			U3=	31,65	Limite	
S11+	125,00	152,29	mm		1062	<25%
S11-	-182,70	-246,05			-610	<35%
S22+	14,74	13,95			31	<45%
S22-	-17,58	-19,58			-118	<55%
S12+	18,97	23,53			72	>55%
S12-	-22,70	-20,23			-72	

MODELO 1DA						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				Orientação
Tensões			$U3=$	31,70	Limite	Camadas
S11+	136,7	165,12	mm		1062	
S11-	-201,10	-257,42			-610	0
S22+	16,99	16,27			31	90
S22-	-20,16	-18,72			-118	90
S12+	21,38	25,71			72	0
S12-	-25,91	-23,63			-72	

MODELO 1DA						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	3	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	31,75	Limite	
S11+	170,60	217,39	mm		1062	<25%
S11-	-240,10	-316,15			-610	<35%
S22+	20,78	20,70			31	<45%
S22-	-24,22	-22,81			-118	<55%
S12+	25,62	30,55			72	>55%
S12-	-32,28	-26,39			-72	

Resultados do Modelo 1DB

MODELO 1DB						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	31,34	Limite	
S11+	110,10	130,49	mm		1062	<25%
S11-	-135,70	-181,01			-610	<35%
S22+	7,90	9,42			31	<45%
S22-	-11,57	-13,73			-118	<55%
S12+	10,92	17,89			72	>55%
S12-	-13,43	-12,54			-72	

MODELO 1DB						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	117,60	140,93			1062	<25%
S11-	-159,90	-210,76			-610	<35%
S22+	9,98	11,69			31	<45%
S22-	-14,28	-16,12			-118	<55%
S12+	12,35	15,53			72	>55%
S12-	-15,23	-15,34			-72	

MODELO 1DB						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	7	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	31,55	Limite	
S11+	129,00	156,90	mm		1062	<25%
S11-	-183,20	-239,18			-610	<35%
S22+	13,07	14,95			31	<45%
S22-	-18,52	-20,49			-118	<55%
S12+	14,56	17,64			72	>55%
S12-	-13,68	-18,77			-72	

MODELO 1DB						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				Orientação
Tensões			$U3=$	31,59	Limite	Camadas
S11+	138,8	170,25	mm		1062	
S11-	-202,10	-262,27			-610	0
S22+	15,52	14,21			31	45
S22-	-21,51	-23,74			-118	90
S12+	16,27	19,31			72	45
S12-	-15,54	-21,59			-72	0

MODELO 1DB						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	3	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$	31,64	Limite	
S11+	170,20	212,07	mm		1062	<25%
S11-	-242,10	-309,23			-610	<35%
S22+	19,61	19,57			31	<45%
S22-	-26,29	-28,66			-118	<55%
S12+	19,27	22,71			72	>55%
S12-	-19,38	-21,63			-72	

Resultados do Modelo 1DC

MODELO 1DC						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$		Limite	
S11+	110,40		mm		1062	<25%
S11-	-152,30				-610	<35%
S22+	13,10				31	<45%
S22-	-14,30				-118	<55%
S12+	13,19				72	>55%
S12-	-15,15				-72	

MODELO 1DC						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				Orientação
Tensões			$U3=$	31,88	Limite	Camadas
S11+	135,6	168,96		mm	1062	
S11-	-191,80	-259,35			-610	0
S22+	17,60	16,19			31	-45
S22-	-19,79	-21,16			-118	90
S12+	18,39	22,13			72	-45
S12-	-21,41	-17,15			-72	0

MODELO 1DC						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	3	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$		Limite	
S11+	169,90			mm	1062	<25%
S11-	-229,50				-610	<35%
S22+	20,87				31	<45%
S22-	-23,11				-118	<55%
S12+	22,32				72	>55%
S12-	-26,85				-72	

Resultados do Modelo 1DD

MODELO 1DD						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			$U3=$		Limite	
S11+	44,94			mm	1062	<25%
S11-	-62,61				-610	<35%
S22+	28,56				31	<45%
S22-	-38,58				-118	<55%
S12+	11,32				72	>55%
S12-	-12,65				-72	

MODELO 1DD						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões		Comparação com 1DB			Limite	Camadas
S11+	69,37		138,80		1062	
S11-	-93,37		-202,10		-610	90
S22+	34,07		15,52		31	45
S22-	-48,49		-21,51		-118	0
S12+	16,02		16,27		72	45
S12-	-16,66		-15,54		-72	90

Resultados do Modelo 1DE

MODELO 1DE						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>		Limite	
S11+	118,60		mm		1062	<25%
S11-	-163,40				-610	<35%
S22+	12,25				31	<45%
S22-	-13,71				-118	<55%
S12+	13,93				72	>55%
S12-	-16,76				-72	

MODELO 1DE						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões			Comparação com 1DB		Limite	Camadas
S11+	139,90		138,80		1062	
S11-	-205,90		-202,10		-610	0
S22+	17,74		15,52		31	90
S22-	-20,31		-21,51		-118	45
S12+	18,55		16,27		72	90
S12-	-17,20		-15,54		-72	0

Resultados do Modelo 1DF

MODELO 1DF						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>		Limite	
S11+	120,10		mm		1062	<25%
S11-	-168,40				-610	<35%
S22+	11,53				31	<45%
S22-	-13,38				-118	<55%
S12+	16,08				72	>55%
S12-	-18,73				-72	

MODELO 1DF						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões			Comparação com 1DB		Limite	Camadas
S11+	143,10		138,80		1062	
S11-	-211,50		-202,10		-610	0
S22+	16,53		15,52		31	90
S22-	-19,43		-21,51		-118	90
S12+	21,71		16,27		72	90
S12-	-26,25		-15,54		-72	0

Resultados do Modelo 1DG

MODELO 1DG						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	112,90				1062	<25%
S11-	-155,20				-610	<35%
S22+	13,15				31	<45%
S22-	-14,19				-118	<55%
S12+	12,56				72	>55%
S12-	-15,13				-72	

MODELO 1DG						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões	Comparação com 1DB			Limite	Camadas	
S11+	136,60		138,80	1062		
S11-	-195,80		-202,10	-610		0
S22+	18,37		15,52	31		45
S22-	-20,51		-21,51	-118		90
S12+	17,02		16,27	72		-45
S12-	-15,45		-15,54	-72		0

Resultados do Modelo 1DH

MODELO 1DH						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões					Limite	
S11+	112,90				1062	<25%
S11-	-155,10				-610	<35%
S22+	13,17				31	<45%
S22-	-14,16				-118	<55%
S12+	12,65				72	>55%
S12-	-10,57				-72	

MODELO 1DH						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	5	<i>Massa</i>	74,08	<i>Dimensões</i>	4*12*4
Tipo EF	Lineares		Lineares			Orientação
Tensões	Comparação com 1DB			Limite	Camadas	
S11+	136,90		138,80	1062		
S11-	-195,80		-202,10	-610		0
S22+	18,41		15,52	31		-45
S22-	-20,44		-21,51	-118		90
S12+	17,18		16,27	72		45
S12-	-15,19		-15,54	-72		0

Comparação dos resultados dos modelos

	S11+	S11-	S22+	S22-	S12+	S12-	Tensões
MODELO	1062	-610	31	-118	72	-72	Limite
1	568,20	-427,60	236,40	-189,60	90,83	-75,61	Dim.EF 7
1A	169,70	-229,30	28,30	-43,87	38,09	-31,52	
1B	129,70	-167,60	19,59	-26,53	27,52	-23,11	
1C	119,30	-167,00	17,90	-22,86	24,89	-22,08	Tipo EF Linear
1D	112,70	-162,40	17,37	-21,91	24,31	-21,44	
1DA	125,00	-182,70	14,74	-17,58	18,97	-22,70	
1DB	129,00	-183,20	13,07	-18,52	14,56	-13,68	
1DC	120,90	-174,10	15,64	-17,62	16,11	-18,75	
1DD	58,59	-80,61	31,52	-44,07	14,11	-14,92	
1DE	130,10	-186,80	15,34	-17,59	16,54	-20,59	
1DF	131,40	-192,20	14,35	-16,96	19,26	-23,06	
1DG	123,80	-177,60	16,09	-17,95	15,07	-18,63	
1DH	123,80	-177,50	16,12	-17,90	15,20	-18,37	

	S11+	S11-	S22+	S22-	S12+	S12-	Tensões
MODELO	1062	-610	31	-118	72	-72	Limite
1	689,00	-741,20	148,20	-148,20	146,50	-126,10	Dim.EF 5
1A	319,10	-319,30	31,65	-31,65	34,27	-34,76	
1B	228,10	-228,20	23,58	-23,59	23,35	-24,94	
1C	133,40	-184,10	20,72	-26,45	27,80	-25,14	Tipo EF Linear
1D	127,50	178,90	20,10	-25,37	27,18	-24,42	
1DA	136,70	-201,10	16,99	-20,16	21,38	-25,91	
1DB	138,80	-202,10	15,52	-21,51	16,27	-15,54	
1DC	135,60	-191,80	17,60	-19,79	18,39	-21,41	
1DD	69,37	-93,37	34,07	-48,49	16,02	-16,66	
1DE	139,90	-205,90	17,74	-20,31	18,55	-17,20	
1DF	143,10	-211,50	16,53	-19,43	21,71	-26,25	
1DG	136,60	-195,80	18,37	-20,51	17,02	-15,45	
1DH	136,90	-195,80	18,41	-20,44	17,18	-15,19	

	S11+	S11-	S22+	S22-	S12+	S12-	Tensões
MODELO	1062	-610	31	-118	72	-72	Limite
1	911,80	-963,00	189,40	-189,50	177,70	-137,10	Dim.EF 3
1A	371,10	-371,70	39,90	-40,58	43,08	-44,84	
1B	264,20	-264,70	28,38	-30,38	29,75	-32,29	
1C	204,80	-204,90	19,57	-19,58	30,54	23,48	Tipo EF Linear
1D	159,20	-212,70	24,71	-30,68	32,47	-30,43	
1DA	170,60	-240,10	20,78	-24,22	25,62	-32,28	
1DB	170,20	-242,10	19,61	-26,29	19,27	-19,38	
1DC	169,90	-229,50	20,87	-23,11	22,32	-26,85	
1DD	87,37	-113,90	39,03	-57,81	19,98	-19,73	
1DE	174,00	-246,20	18,35	-24,63	22,09	-21,53	
1DF	178,60	-252,50	20,20	-23,31	26,02	-32,71	
1DG	170,60	-234,60	18,76	-24,52	20,45	-19,43	
1DH	170,90	-234,50	18,78	-24,43	20,67	-19,12	

Anexo D.2 - Resultados para o Modelo 2

Resultados utilizando elementos de dimensão 30

MODELO 2						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	30	<i>Massa</i>	73,63	<i>Dimensões</i>	I-160*80*8
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	42,24	Limite	
S11+	146,30	152,45	mm		240	<25%
S11-	-118,60	-116,83			-240	<35%
S22+	18,07	26,99			50	<45%
S22-	-19,07	-28,81			-70	<55%
S12+	27,32	35,61			25	>55%
S12-	-26,12	-31,48			-25	

MODELO 2A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	30	<i>Massa</i>	92,87	<i>Dimensões</i>	I-200*100*10
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	21,22	Limite	
S11+	86,21	95,74	mm		240	<25%
S11-	-79,99	-76,89			-240	<35%
S22+	14,53	18,57			50	<45%
S22-	-15,31	-17,11			-70	<55%
S12+	19,92	24,54			25	>55%
S12-	-18,08	-22,03			-25	

Resultados utilizando elementos de dimensão 15

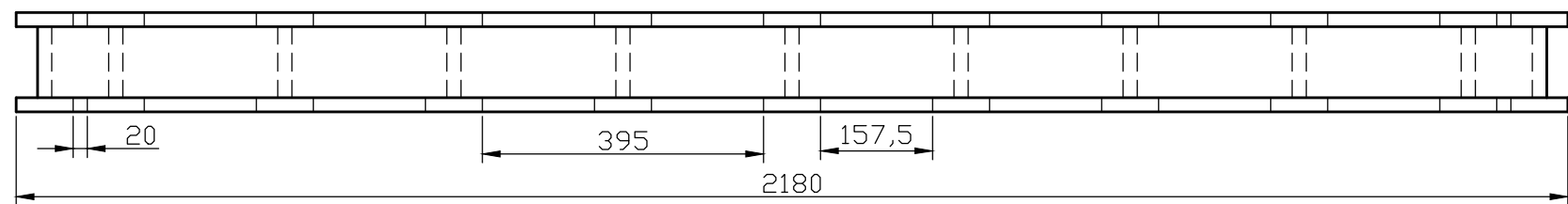
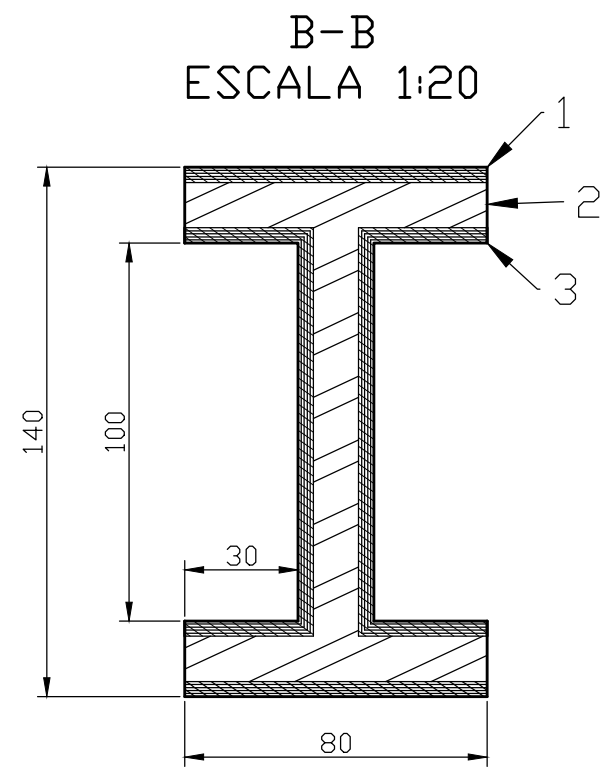
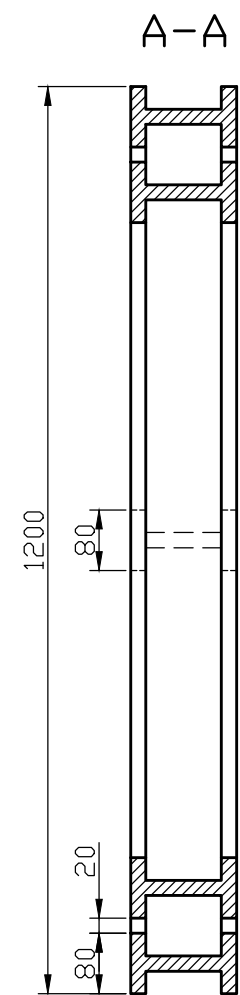
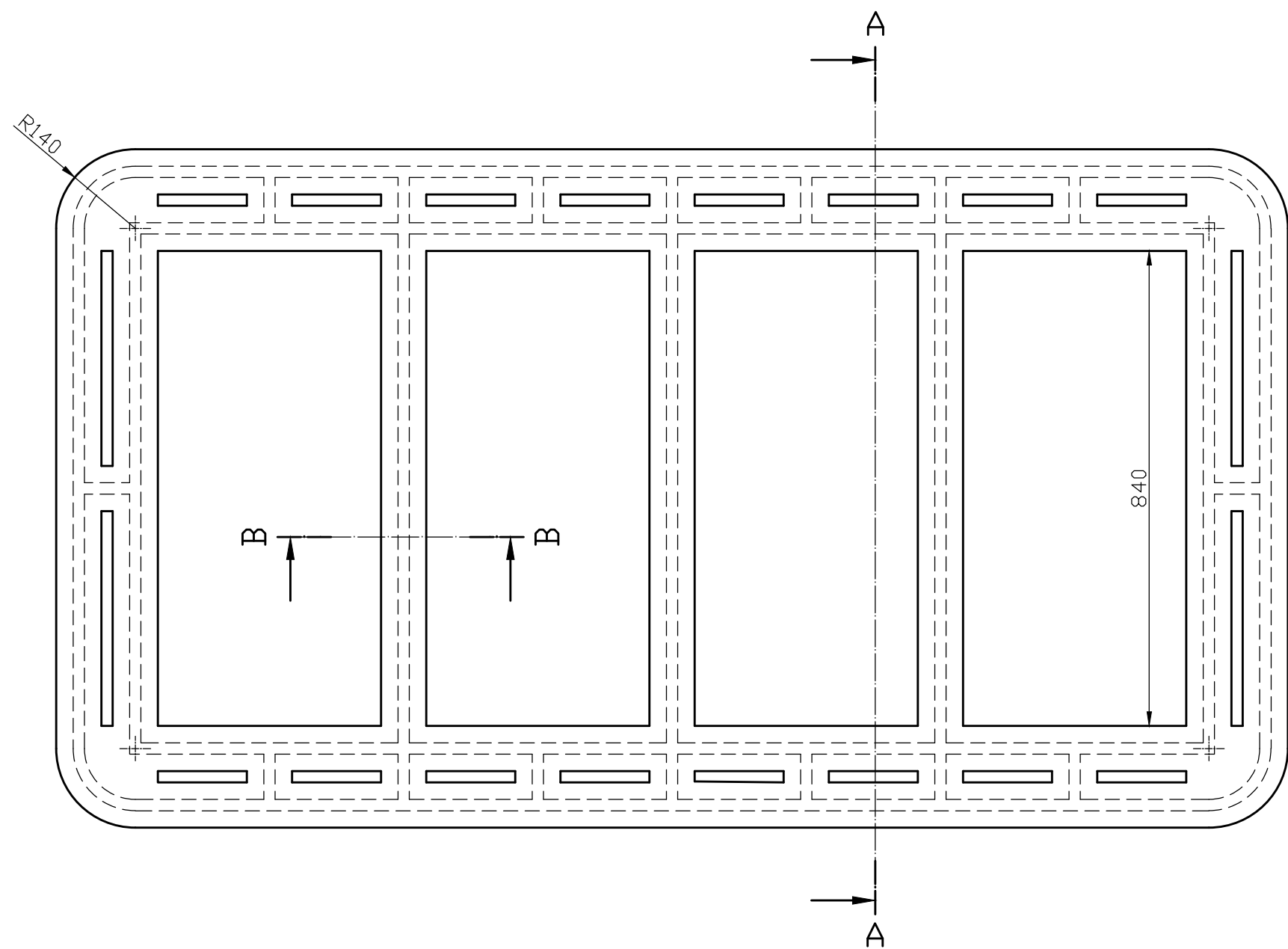
MODELO 2						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	73,63	<i>Dimensões</i>	I-160*80*8
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	42,81	Limite	
S11+	173,80	188,90	mm		240	<25%
S11-	-171,80	-137,30			-240	<35%
S22+	29,80	36,89			50	<45%
S22-	-30,27	-38,47			-70	<55%
S12+	39,00	48,95			25	>55%
S12-	-34,65	-42,15			-25	

MODELO 2A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	15	<i>Massa</i>	92,87	<i>Dimensões</i>	I-200*100*10
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	21,37	Limite	
S11+	99,61	106,00	mm		240	<25%
S11-	-99,28	-85,05			-240	<35%
S22+	17,04	21,00			50	<45%
S22-	-17,14	-21,52			-70	<55%
S12+	14,40	27,66			25	>55%
S12-	-19,57	-24,53			-25	

Resultados utilizando elementos de dimensão 10

MODELO 2						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	73,63	<i>Dimensões</i>	I-160*80*8
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	42,96	Limite	
S11+	200,70	207,17	mm		240	<25%
S11-	-199,40	-164,91			-240	<35%
S22+	33,21	38,81			50	<45%
S22-	-34,09	-53,46			-70	<55%
S12+	43,94	55,63			25	>55%
S12-	-38,49	-48,05			-25	

MODELO 2A						
Caso 1	<i>Dim.EF</i>	10	<i>Massa</i>	92,87	<i>Dimensões</i>	I-200*100*10
Tipo EF	Lineares	Quadráticos				
Tensões			<i>U3=</i>	21,45	Limite	
S11+	122,90	126,55	mm		240	<25%
S11-	-122,10	-101,48			-240	<35%
S22+	19,95	25,10			50	<45%
S22-	-19,87	-23,86			-70	<55%
S12+	19,03	35,71			25	>55%
S12-	-25,26	-31,19			-25	



1	Camada ext.	0º	Fibra de Vidro	0,8	3
1		45º	Fibra de Vidro	0,8	3
1		90º	Fibra de Vidro	0,8	3
1		45º	Fibra de Vidro	0,8	3
1	Camada int.	0º	Fibra de Vidro	0,8	3
1	Espuma	-	Poliuretano	12	2
1	Camada int.	0º	Fibra de Vidro	0,8	1
1		45º	Fibra de Vidro	0,8	1
1		90º	Fibra de Vidro	0,8	1
1		45º	Fibra de Vidro	0,8	1
1	Camada ext.	0º	Fibra de Vidro	0,8	1
Qt.	Designação	Orientação	Material	Espessura	Nº

PROJECTOU DESENHO VERIFICOU	DATA	NOME	Rui Pedro dos Santos Costa up201308536	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIV DO PORTO Rua Dr. Roberto Frias s/n 4200-465 Porto https://sigarra.up.pt/feup/pt/web_page inicial
ESCALA 1:100	CHASSI SADO 550			DES. Nº 1/1
				SUBSTITUI SUBSTITUIDO